

MARTIN J.-D. OTIS

**ANALYSE, COMMANDE ET INTÉGRATION D'UN
MÉCANISME PARALLÈLE ENTRAÎNÉ PAR DES CÂBLES
POUR LA RÉALISATION D'UNE INTERFACE HAPTIQUE
COMME MÉTAPHORE DE NAVIGATION DANS UN
ENVIRONNEMENT VIRTUEL**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en génie électrique
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2009

© Martin J.-D. Otis, 2009

Résumé

Un domaine de la recherche en ingénierie des systèmes est de développer des systèmes supervisés semi-autonomes qui interagissent à un très haut niveau avec l'humain. Ces systèmes intelligents ont les capacités d'analyser et de traiter certaines informations pour produire un comportement général observable par les capacités sensorielles et temporelles de l'humain. Il est donc nécessaire de définir un environnement créatif qui interface efficacement l'humain aux informations pour rendre de nouvelles expériences multi-sensorielles optimisant et facilitant la prise de décision. En d'autres mots, il est possible de définir un système multi-sensoriel par sa capacité à augmenter l'optimisation de la prise de décision à l'aide d'une interface qui définit un environnement adapté à l'humain. Un système haptique dans un environnement virtuel incluant une collaboration et une interaction entre l'humain, les mécanismes robotisés et la physique de la réalité virtuelle est un exemple. Un système haptique doit gérer un système dynamique non-linéaire sous-contraint et assurer sa stabilité tout en étant transparent à l'humain. La supervision de l'humain permet d'accomplir des tâches précises sans se soucier de la complexité de la dynamique d'interactions alors que le système gère les différents problèmes antagonistes dont de stabilité (délai de la communication en réseau, stabilité des rendus, etc.), de transparence et de performance.

Les travaux de recherche proposés présentent un système multi-sensoriel visuo-haptique qui asservisse l'interaction entre l'humain, un mécanisme et la physique de l'environnement virtuel avec une commande bilatérale. Ce système permet à l'humain de réaliser des fonctions ou des missions de haut niveau sans que la complexité de la dynamique d'interaction limite la prise de décision. Plus particulièrement, il sera proposé

de réaliser une interface de locomotion pour des missions de réadaptation et d'entraînement. Ce projet, qui est nommé NELI (*Network Enabled Locomotion Interface*), est divisé en plusieurs sous-systèmes dont le mécanisme entraîné par des câbles nommé CDLI (*Cable Driven Locomotion Interface*), le système asservi avec une commande bilatérale qui assure le rendu de la locomotion, la réalité virtuelle qui inclut la physique de l'environnement, le rendu haptique et le rendu visuel.

Dans un premier temps, cette thèse propose une méthode qui assure la qualité de la réponse de la transmission en augmentant la transparence dynamique de l'asservissement articulaire d'une manière automatique. Une approche d'optimisation, basée sur une amélioration des *Extremum Seeking Tuning*, permet d'ajuster adéquatement les paramètres des régulateurs et définit le critère de l'assurance qualité dans le cas d'une production massive. Cet algorithme est ensuite utilisé, pour étudier le rendu d'impédance avec l'aide de la modélisation d'un câble et de l'enrouleur. Cette modélisation permet de définir un asservissement articulaire hybride qui est utilisé dans la commande hybride cartésienne afin d'assurer le rendu haptique. Dans un troisième temps, dans un contexte de sécurité, la gestion des interférences entre les pièces mécaniques de l'interface de locomotion est décrite avec une méthode d'estimation des collisions des câbles. Une démonstration des interférences entre les câbles de deux plates-formes est simulée démontrant la faisabilité de l'approche. Finalement, la définition d'un moteur physique par un rendu haptique hybride au niveau de la commande cartésienne est présentée en considérant la géométrie des points de contact entre le modèle du pied virtuel et un objet virtuel. Cette approche procure la stabilité d'interaction recherchée lors de la simulation d'un contact infiniment rigide. Un robot marcheur de marque Kondo est embarqué sur l'interface de locomotion pour interagir avec les objets virtuels. Les résultats de la marche du robot dans l'environnement virtuel concrétisent le projet et servent de démonstrateur technologique.

Avant-propos

Une interface de locomotion en modèle réduit, pour un robot marcheur de marque Kondo, a été conçue et fabriquée, démontrant ainsi l'efficacité de la collaboration de trois groupes de recherche. Cette synergie a permis d'intégrer un système haptique avec une capacité multi-usagers reliés par le réseau Internet.

Ce système est divisé en plusieurs sous-systèmes dont le mécanisme entraîné par des câbles nommé CDLI, développé par le Laboratoire de Robotique de l'Université Laval sous la supervision du professeur Clément Gosselin, le système asservi avec une commande bilatérale qui assure le rendu de la locomotion développé par le Laboratoire de Vision et des Systèmes Numériques sous la supervision du professeur Denis Laurendeau, la réalité virtuelle qui inclut la physique de l'environnement développée par le Laboratoire d'Immersion Virtuelle au centre de Recherche et Développement pour la Défense Canada à Valcartier avec l'aide de la chercheuse Marielle Mokhtari, le rendu haptique et le rendu visuel. Ces travaux n'auraient jamais pu être réalisés sans l'aide du CIRRS (*Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale*) et le Dr. Bradford McFadyen qui a fourni l'ensemble des données pour la simulation d'une marche humaine normale.

Ce projet est le résultat d'un effort considérable de l'intégration d'un système complexe. Entre autres, j'ai pu superviser directement deux stagiaires, dont Thien-Ly Nguen Dang qui a réalisé un travail tout à fait exceptionnel et François-Michel De Rainville qui a travaillé sur plusieurs aspects de l'environnement virtuel. J'ai pu travailler conjointement avec un étudiant au doctorat, Simon Perreault qui a assuré le développement de la géométrie du mécanisme et qui a continué l'étude des interférences, et trois ingé-

nieurs de recherche, soient Denis Ouellet, Sylvain Comtois et Thierry Laliberté. Tout le système d'acquisition a été réalisé par Denis Ouellet, qui est en fait un travail de patience et de dévouement. D'un autre côté, les pilotes matériels ont été maintenus par Sylvain Comtois, qui est toujours disponible pour nous sortir d'un problème majeur.

Je dois aussi remercier mes deux directeurs Denis Laurendeau et Clément Gosselin pour leur patience envers mes différents projets dont mon implication dans le Groupe Aérospatial de l'Université Laval (GAUL) et deux compétitions de danse amateurs Pro-AM. Le GAUL m'a permis de gérer environ 15 étudiants de premier cycle pendant deux années. Le groupe a été finaliste à Forces-AVENIR; démontrant la crédibilité et l'engagement social et technique. Il a aussi obtenu un premier prix de design au Forum Étudiant en Aérospatial. J'ai finalement été nommé comme *étudiant méritant* par l'AESGUL en 2006. Lors de cette implication, j'ai pu réaliser une courte revue de la littérature dans l'objectif d'améliorer le manipulateur robotique des souffleries à veine ouverte et trisonique du centre de Recherche et Développement pour la Défense Canada à Valcartier. Finalement, lors de la conférence *AIP 2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation*, j'ai occupé la présidence d'une séance et j'ai obtenu le premier prix du meilleur article pour une contribution majeure.

Je remercie aussi mes directeurs pour m'avoir permis de réaliser un mini tour du monde, tout à fait exceptionnel, en participant à quatre conférences : Reno, Zarzis, Roma et Kobe. Je garde en mémoire cette expérience inoubliable et j'espère qu'elle sera un tremplin pour forger un avenir encore plus prometteur.

*À ma mère Gaétane et mon père Rosaire pour leur
support durant toutes ces années.*

Table des matières

Résumé	i
Avant-propos	iii
Table des matières	vi
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
Acronymes	xvii
1 Introduction	1
1.1 Généralités	1
1.2 Problématique	3
1.2.1 Problématique conceptuelle	4
1.2.2 Problématique architecturale	6
1.3 Évaluation des interfaces de locomotion	7
1.3.1 Taxonomie de l'interface de locomotion	8
1.3.2 Facteurs de qualité et mesure des performances	9
1.3.3 Qualité de la navigation	11
1.3.4 Problème de perception et de malaises	14
1.3.5 Méthodes de réduction des malaises	15
1.4 Système global définissant l'interface de locomotion	17
1.4.1 Les entrées du système	17
1.4.2 Les sorties du système	19
1.5 Structure de la thèse	22

2	Les interfaces de locomotion	26
2.1	Introduction	27
2.2	Revue de littérature sur les interfaces de locomotion	28
2.2.1	Marche sur place et interface de glissement	28
2.2.2	Plate-forme programmable	30
2.2.3	Tapis roulant	35
2.2.3.1	Tapis roulant ATLAS/GSS	36
2.2.3.2	Tapis roulant ODT	37
2.2.3.3	Tapis roulant <i>Torus</i>	39
2.2.4	Consortium Européen du projet <i>CyberWalk</i>	39
2.2.5	Les autres systèmes	40
2.3	Applications des interfaces de locomotion	42
2.4	Applications des mécanismes entraînés par des câbles	43
2.5	Stabilité d'interaction entre l'humain et une interface haptique	45
2.6	Conclusion	49
3	Architecture de l'interface de locomotion	51
3.1	Introduction	52
3.2	Problématique	52
3.2.1	Diagramme physique	53
3.2.2	Contexte d'application	54
3.2.3	Modélisation de la démarche humaine	58
3.2.3.1	Le cycle de la marche	59
3.2.3.2	Paramètres biomécaniques	60
3.2.3.3	Modélisation de la démarche	62
3.2.4	Cahier des charges	63
3.3	Spécifications matérielles et logicielles	65
3.3.1	Limites sécuritaires sur les accélérations	68
3.3.1.1	Seuils de perception des accélérations	68
3.3.1.2	Seuils des accélérations sur l'asservissement de l'équilibre	69
3.3.1.3	Seuils des accélérations sans lésion [1]	69
3.4	La géométrie de l'interface de locomotion	71
3.5	Architecture logicielle de l'asservissement du servocontrôleur	76
3.5.1	Cinématique et dynamique du mécanisme	78
3.5.2	Approche du calcul des interférences	79
3.5.3	Algorithme d'estimation d'un événement	80
3.5.4	Algorithme de rappel (<i>Washout</i>) et harnais (<i>tether</i>)	81

3.6	Conclusion	83
4	Algorithme d'ajustement automatique de l'asservissement	84
4.1	Introduction	85
4.1.1	Système d'acquisition	86
4.2	Fonction de transfert d'un enrouleur	88
4.2.1	Approximation au second ordre	88
4.2.2	Estimation expérimentale de la fonction de transfert	89
4.3	Architecture de l'asservissement articulaire	90
4.4	Ajustement automatique de l'asservissement articulaire	90
4.4.1	Transparence et fonction objective de coût	91
4.4.2	Mise en oeuvre pratique de l'ES-Tuning	92
4.4.3	Paramètres d'entrées de l'ES-Tuning	94
4.4.4	Conception et choix des paramètres d'optimisation	95
4.4.5	Réduction du bruit de boucle	98
4.5	Amélioration de l'algorithme	99
4.6	Étude de la performance de l'algorithme d'optimisation	100
4.7	Conclusion	102
5	Analyse de la transparence pour le rendu d'impédance	104
5.1	Introduction	105
5.2	Conception mécanique des enrouleurs	107
5.3	Comportement et physique d'un câble	108
5.3.1	Élasticité du câble	109
5.3.2	Ratio de la différence de tension relative	110
5.3.3	Déviation maximale en position	111
5.4	Transparence de la commande en impédance	112
5.4.1	Hystérésis aux oeillets de deux enrouleurs	113
5.4.2	Détermination du ratio d'atténuation	114
5.4.3	Dynamique du câble et effet sur l'ES-Tuning	116
5.5	Architecture de l'asservissement articulaire d'un enrouleur	119
5.6	Conclusion	121
6	Détermination et gestion des interférences	124
6.1	Introduction	125
6.1.1	Espace de travail des plates-formes de l'interface de locomotion	127
6.1.2	Optimisation de la distribution des tensions (ODT)	128
6.1.3	Stratégie de contrôle lors de la gestion des interférences	130

6.2	Algorithme de la gestion des interférences entre les câbles	131
6.2.1	Détermination géométrique des interférences	132
6.2.2	Détermination du point d'interférence	135
6.2.3	Selection du câble à relâcher	136
6.3	Réduction de la discontinuité de la tension	137
6.3.1	Estimation du temps d'arrivée de l'interférence (ETAI)	139
6.3.2	Ajustement des contraintes dans l'ODT	141
6.4	Résultats pour une démarche lente et normale	144
6.4.1	Paramètres de la simulation	145
6.4.2	Analyse de la tension minimale dans les câbles	146
6.4.3	Analyse de la prédiction de l'interférence (ETAI)	146
6.4.4	Interférence entre les câbles de la plate-forme de droite	147
6.4.5	Interférence entre les câbles des deux plates-formes	149
6.5	Conclusion	151
6.6	Travaux futurs	152
7	Commande hybride cartésienne pour le rendu haptique	154
7.1	Introduction	155
7.1.1	Classes de la commande pour le rendu haptique	157
7.1.2	Problèmes de stabilité	159
7.1.3	Architecture logicielle de l'asservissement des plates-formes . . .	162
7.1.3.1	Gestionnaire de l'environnement virtuel	162
7.1.3.2	Gestionnaire de l'asservissement	164
7.1.4	Compensations cartésiennes	166
7.1.5	Plan de la gestion de la sécurité	168
7.2	Commande hybride haptique	169
7.3	Définition de la géométrie des points de contact	172
7.3.1	Point de contact unique	174
7.3.2	Double points de contact	175
7.3.3	Trois points de contact ou plus	176
7.4	Rendu de l'affichage haptique (RAH)	176
7.4.1	Calcul du torseur de réaction	177
7.4.2	Problème d'optimisation des forces (POF)	179
7.4.3	Résultats du POF	180
7.5	Impacts dynamiques élevés	182
7.6	Conclusion	183
7.7	Travaux futurs	184

8 Travaux futurs	186
8.1 Harnais actif	187
8.2 Algorithme de rappel	188
8.2.1 Algorithme et comportement du rappel dans un DDL	190
8.2.2 Conclusion	196
8.3 Environnements virtuels distribués partagés	197
9 Conclusion	199
9.1 Introduction	200
9.2 Simulateur HIL	201
9.3 Contributions	202
9.4 Améliorations techniques	206
Index	208
Bibliographie	210
A Liste des extensions multimédia sur le DVD d'accompagnement	233
A.1 Fonctionnement du DVD	234
A.1.1 Explication des clips vidéos	234
A.1.1.1 Objectifs et sécurité d'interaction	235
A.1.1.2 Optimisation de l'asservissement	235
A.1.1.3 Rendu de l'impédance	235
A.1.1.4 Gestion des interférences	235
A.1.1.5 Intégration avec une commande hybride	236
A.1.1.6 Problème d'optimisation des forces	236
A.1.1.7 Conclusion et résultats finaux	236
A.1.1.8 Compilation de clips	236
A.1.2 Explication des images	236
A.1.3 Documentation supplémentaire sur le mécanisme	237

Liste des tableaux

1.1	Informations sensorielles [2]	6
3.1	Temps de contact au sol [2]	62
3.2	Vitesses moyennes	62
3.3	Types de mouvement permis [3]	64
3.4	Paramètres approximatifs pour les informations sensorielles [4]	65
3.5	Seuils de perception des accélérations [5]	68
3.6	Seuils des accélérations sur l'asservissement de l'équilibre [6]	69
7.1	Comparaisons des classes de la commande haptique	157

Liste des figures

1.1	Taxinomie des interfaces de locomotion pour un environnement virtuel immersif	9
1.2	<i>Virtual Guiding Avatar</i>	17
1.3	Diagramme de contexte de l'interface de locomotion	18
1.4	Système global définissant l'interface de locomotion	21
1.5	Les deux plates-formes du mécanisme parallèle entraîné par des câbles avec l'écran de l'environnement virtuel [7]	23
1.6	Harnais actif (mécanisme dans le dos) et sangle d'armature passive sur le <i>SARCOS</i> [8]	23
1.7	Structure de la thèse	24
2.1	Principe du fonctionnement mécanique du <i>String Walker</i> [9]	30
2.2	Anneau rotatif des actionneurs du <i>String Walker</i> [9]	30
2.3	Principe du fonctionnement mécanique du <i>GaitMaster</i> [10]	32
2.4	Système complet du <i>HapticWalker</i> de Schmidt [11]	32
2.5	Cycle associé au mouvement d'un pied pour monter des escaliers avec un rappel de la position [12]	34
2.6	Cycle associé au mouvement d'un pied pour marcher sur une surface plane [12]	34
2.7	Interface de locomotion actionné avec des courroies de distribution [13]	35
2.8	Interface de locomotion actionné avec des plates-formes de Gough-Stewart [14]	35
2.9	Principe du fonctionnement mécanique de l' <i>ATLAS</i> [15]	37

2.10 Paliers à mouvement vertical du GSS [16]	37
2.11 Principe de fonctionnement du <i>ODT</i> [17]	38
2.12 Principe du fonctionnement mécanique du <i>Torus</i> [18]	38
2.13 Le <i>CyberCarpet</i> en version <i>ODT</i> [19]	40
2.14 Le <i>CyberCarpet</i> avec un roulement à billes [20]	40
2.15 Principe du fonctionnement mécanique de la <i>CyberSphere</i> [21]	42
2.16 Principe du fonctionnement du <i>CirculaFloor</i> [22]	42
2.17 Le numériseur d'images 3D [23]	44
2.18 Dispositif haptique de Kino [24]	44
2.19 Mécanisme de réadaptation pour les membres inférieurs [25]	45
2.20 Mécanisme de réadaptation pour les membres supérieurs [26]	45
2.21 Commande en admittance pour des robots coopératif [27]	48
2.22 Modèle dynamique du système coopératif [28]	48
3.1 Configurations matérielle et logicielle de l'IL	55
3.2 Intervenants dans le projet NELI	56
3.3 Fabrication des enrouleurs avec l'amplificateur 4-20 mA	57
3.4 Interface de locomotion finale avec le robot marcheur et S. Perreault	57
3.5 Système de coordonnées spatiales (version modifiée de [29])	59
3.6 Les centres de gravité du corps humain [30]	59
3.7 Les divisions du cycle de marche [30]	60
3.8 Les forces appliquées au plancher par les pieds [31]	60
3.9 Mouvement du pied dans la phase d'appui [30]	61
3.10 Rotation du bassin dans le plan transversal [30]	61
3.11 Modèle anthropomorphique en 3D du squelette [32]	63
3.12 Définition des directions des accélérations [1]	70
3.13 Force centrifuge $+G_z$ [1]	71
3.14 Force centrifuge $-G_z$ [1]	71
3.15 Modèle CAD du mécanisme complet [33]	73
3.16 Vue de face du mécanisme complet [33]	73
3.17 Position des aimants permanents et du capteur d'efforts sous le pied du robot marcheur	74
3.18 Vue de côté du mécanisme	74
3.19 Vue de dessus d'une plate-forme	74
3.20 Modèle du pied virtuel en contact avec les objets virtuels	75
3.21 Description générale du processus de l'algorithme du servocontrôleur	77

4.1	Les quatre amplificateurs et l'ordinateur qui contient le servocontrôleur	87
4.2	Connecteurs à l'arrière de l'ordinateur pour l'acquisition des signaux analogiques des amplificateurs 4-20mA	87
4.3	Algorithme ES-Tuning complet avec le régulateur de la tension de l'enrouleur	93
4.4	Réponses transitoires de quatre enrouleurs différents couplés avec la structure du mécanisme	100
4.5	Évolution de la fonction de coût	100
4.6	Évolution de la fonction de coût lors d'un mauvais ajustement des paramètres	101
4.7	Évolution des paramètres PIDF avec et sans la variation automatique de α_i et γ_i	101
4.8	Évolution de la fonction de coût lors d'un ajustement automatique des paramètres α_i et γ_i	102
4.9	Réponse de la tension dans un câble pour une consigne sinusoïdale (0,4 Hz)	102
5.1	Conception mécanique de l'enrouleur	108
5.2	Un groupe de quatre enrouleurs qui asservisse la tension et la position des câbles	108
5.3	Définition des termes de tensions et de frottements	110
5.4	Courbe d'hystérésis dans la mesure de la tension dans un câble	114
5.5	Ratio d'atténuation B en fonction des consignes en tension	116
5.6	Réponse en fréquence de l'enrouleur pour une tension constante	118
5.7	Réponse en fréquence de l'enrouleur avec une longueur de câble constante (0,5 mètre)	118
5.8	Réponse en fréquence de l'enrouleur avec une longueur de câble constante (1,4 mètre)	118
5.9	Évolution de la fonction de coût pour différentes longueurs de câble	118
5.10	Évolution du coefficient de l'intégrateur du PIDF articulaire	119
5.11	Coefficient de l'intégrateur du PIDF en fonction de la longueur du câble	119
5.12	Position de départ du robot marcheur KHR-1HV sur le socle	120
5.13	Architecture de l'asservissement articulaire d'un enrouleur	120
6.1	Processus de l'algorithme du servocontrôleur lors de la gestion des interférences	130
6.2	Conditions des interférences	134

6.3	Algorithme de la sélection du câble à relâcher	138
6.4	Trois ensembles solutions de l'ODT contraints par un orthotope	143
6.5	Solution de l'ODT pour tous les câbles de la plate-forme de droite (sans interférence et sans tension minimale	145
6.6	Tensions minimale τ_{sag} pour la plate-forme de droite	145
6.7	Estimation du temps d'arrivée de l'interférence	147
6.8	Erreur de position par rapport à celle estimée par l'ETAI	147
6.9	Solution de l'ODT avec la gestion des interférences (interférence entre les câbles 2 et 6) sans l'ETAI	148
6.10	Solution de l'ODT avec les contraintes de tensions ($\tau_{min} \geq \tau_{sag}$) et sans l'ETAI	148
6.11	États des câbles avec une interférence entre les câbles 2 et 6 pour la plate-forme de droite	148
6.12	Analyse de l'espace de travail avec une interférence entre les câbles 2 et 6 pour la plate-forme de droite	148
6.13	Discontinuités des tensions dans les câbles avec l'ETAI	149
6.14	Comparaison des tensions pour les câbles 2 et 6 dans les trois configurations	149
6.15	États des câbles dans le cas d'interférences entre les deux plates-formes	150
6.16	Tensions dans les câbles de la plate-forme de gauche dans le cas d'inter- férences entre les deux plates-formes	150
6.17	Tensions dans les câbles de la plate-forme de droite dans le cas d'inter- férences entre les deux plates-formes	150
7.1	Modèle de l'interface de locomotion avec les quadripôles	158
7.2	Architecture logicielle simplifiée	163
7.3	Commande hybride dans le processus de l'algorithme du servocontrôleur	165
7.4	Vecteurs pour le calcul des compensations cartésiennes	167
7.5	Commande hybride adapté à l'haptique	170
7.6	Description des points de contact pour les trois cas	173
7.7	Modèle de la collision avec les torseurs et les forces impliqués	177
7.8	Modèle du proxy dynamique et de son point d'interaction haptique . .	177
7.9	Les pieds du Kondo KHR-1HV et le capteur d'efforts (\mathbf{h}_a) sur la version réduite de NELI	180
7.10	Version en modèle réduit de NELI avec l'écran de l'environnement virtuel	180
7.11	Somme des forces de réactions normalisée $\ \Gamma_{ri}\ $ à chaque point de contact	182
7.12	Condition du cône de friction	183

7.13	Norme de la force de friction $\ \Gamma_{fi}\ $ comme une composante de la force de réaction	183
7.14	Séquence vidéo de la simulation de la marche pour quatre points de contact	185
8.1	Processus de l'algorithme du servocontrôleur simplifié avec un algorithme de rappel	188
8.2	Paramètres géométriques du rappel	189
8.3	Asservissement de chaque DDL pour l'algorithme de rappel	189
8.4	Paramètres pour l'algorithme de rappel et du harnais	192
8.5	Conservation du point G dans une zone morte [34]	192
8.6	Structure de l'algorithme de rappel dans <i>Simulink</i>	193
8.7	Vitesse de l'utilisateur dans le MV	193
8.8	Position de l'utilisateur dans le MV	193
8.9	Rappel avec un ζ fixe dans le temps à 0,6	194
8.10	Loi de commande du filtre de rappel approximative selon l'ordre du polynôme	194
8.11	Erreurs de position dans l'IL selon l'ordre du polynôme	195
8.12	Action du rappel de l'utilisateur pour différentes vitesses de déplacement dans le MV	195
8.13	Évaluation du paramètre ζ en temps réel	196
8.14	Position de l'utilisateur dans l'IL avec ζ variable	196
8.15	Avantages et inconvénients des trois approches pour les DVE	198
9.1	Enroulement du câble lorsque celui-ci quitte la poulie pour une commande discontinue en tension	201
9.2	Vue arrière des deux enrouleurs avec un problème d'enroulement du câble	201
9.3	Résultat lorsque le mécanisme entre dans une zone instable	202
9.4	Vue arrière du robot marcheur Kondo après une instabilité	202
9.5	Système complet intégré avec les différents modules de NELI	204
A.1	Menu interactif contenu sur le DVD	234

Acronymes

Nom	Description	Page
BIST	<i>Built-in self-test</i>	168
CAVE	<i>Cave Automated Virtual Environment</i>	28
CAN	Conversion analogique-numérique	93
CNA	Conversion numérique-analogique	93
CM	Centre de masse (Repère du CM, O_{CM})	166
COG	Centre de gravité (<i>Center of Gravity</i>)	154
ddl / DDL	degré de liberté	9
EPP	Espace des poses polyvalentes	130
ES-Tuning	Algorithme <i>Extremum Seeking Tuning</i>	90
ETAI	Estimation du temps d'arrivée de l'interférence	139
FPID	Régulateur de type PID avec filtrage de la consigne	90
GEV	Gestionnaire de l'environnement virtuel	162
GUI	<i>Graphical User Interface</i>	
HIL	Simulation <i>Hardware-In-the-Loop</i>	201
HMD	<i>Helmet Mounted Display</i>	28
IHD	Interférence hors-domaine	136
IL	Interface de locomotion	26
ILEC	Interface de locomotion entraînée par des câbles	71
LuGre	Modèle de la friction Lund-Grenoble	119
MR	Monde réel (Repère du MR, O_{MR})	4
MV	Monde virtuel (Repère du MV, O_{MV})	4
NELI	<i>Network Enabled Locomotion Interface</i>	54

Nom	Description	Page
ODT	Optimisation de la distribution des tensions	128
PF	Plate-forme (Repère de la PF, O_{PF})	71
PDD	Problème dynamique direct	78
PGD	Problème géométrique direct	78
PGI	Problème géométrique inverse	78
PIH	Point d'interaction haptique	177
POF	Problème d'optimisation des forces	179
RAH	Rendu de l'affichage haptique	176
RTE	<i>Real Time Error</i>	119
RV	Réalité virtuelle	1
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>	162
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>	162

Chapitre 1

Introduction

1.1 Généralités

L'évolution de l'informatique apporta des périphériques comme la souris et le *joystick*. Il transforme le bureau réel en un bureau virtuel de plus en plus performant et facile à utiliser. Les interfaces d'immersion sont la suite logique de cette évolution et elles joueront un rôle très important dans le développement de l'informatique dans les prochaines décennies. Aujourd'hui, ce sont les périphériques haptiques qui entrent en jeux. Ceux-ci permettent un rapprochement avec l'environnement virtuel de l'ordinateur par l'ajout d'efforts de contre-réaction que l'utilisateur peut ressentir augmentant ainsi la facilité de la navigation et de réalisme de l'immersion. D'ailleurs, plusieurs études sont réalisées pour identifier les facteurs qui influencent l'efficacité des interfaces immersives.

La technologie de la réalité virtuelle exploite du matériel et des logiciels très spécialisés, incluant ceux qui permettent une visualisation 3D en immersion complète avec des interfaces humain-machine pour générer une **simulation d'un monde alternatif** réaliste. L'intérêt grandissant pour la réalité virtuelle a apporté **plusieurs applications** de cette technologie dans les industries de l'automobile, de l'**avionique**, du divertissement, de la médecine, des sports et dans d'autres secteurs d'activité comme l'éducation et l'entraînement. Une de ces applications est d'**immerger complètement un individu** dans un environnement virtuel pour qu'il puisse se mouvoir librement à l'intérieur de celui-ci et réaliser une tâche ou une mission très précise.

Il est possible de définir trois types d'interfaces qui relient l'espace de travail de la réalité physique avec la réalité virtuelle : les **interfaces de mouvement**, les **interfaces de locomotion** et les **interfaces haptiques**. Globalement, les interfaces de mouvement utilisent des métaphores de consigne qui génèrent un déplacement par la variation paramétrique d'un capteur comme, par exemple, l'utilisation d'un gant de réalité virtuelle (ou tout autre objet de pointage) pour choisir la direction et une pédale pour ajuster la vitesse du mouvement. Dans le cas précis où cette interface permet à l'utilisateur de se déplacer dans l'environnement virtuel avec ses jambes ou ses pieds avec une commande en position, le terme *interface de locomotion* est davantage utilisé. Finalement, une interface haptique procure un retour d'efforts qui permet à l'utilisateur de ressentir un ou plusieurs paramètres physiques (ou, par définition, d'avoir une perception tactile) de l'environnement virtuel dans lequel il évolue. Cette perception tactile peut être définie par deux concepts : la perception d'efforts (générée par la forme de l'objet et par la friction entre l'objet et l'interface haptique) par les muscles et la perception de la texture par les mécano-récepteurs de la peau.

Cette thèse propose la conception et la réalisation d'une interface de locomotion haptique qui permettra à un utilisateur de ressentir tous les types d'objets virtuels, incluant les objets fixes ou mobiles avec ses pieds. Il y a donc trois types de rendu à concevoir : le **rendu de la locomotion**, soit la conception de la métaphore de déplacement pour la marche naturelle humaine, le **rendu haptique**, soit la conception de la physique de la réalité virtuelle et le **rendu visuel**, soit la projection des pieds réels dans le monde virtuel et la visualisation de cet environnement. Ce projet constitue une partie de NELI (*Network Enabled Locomotion Interface*) qui ajoute une dimension multi-usagers sur un réseau distribué ou partagé à l'interface de locomotion haptique. Le projet NELI ne sera pas couvert dans cet ouvrage puisqu'il est présenté dans [35].

1.2 Problématique

Plusieurs aspects de la locomotion peuvent interagir avec les systèmes mécaniques et les logiciels dont, notamment, le suivi des trajectoires de chacun des membres responsables du mouvement et la liberté de l'exécution des mouvements. D'ailleurs, la locomotion incluant l'ensemble des mouvements des membres d'un individu dans un environnement virtuel à grande échelle est un domaine de recherche en pleine expansion. Des moyens plus simples pour se déplacer dans cet environnement sont, par exemple, l'utilisation de périphériques comme la souris d'ordinateur ou le clavier. De la même manière, l'utilisation d'un pédalier (comme ceux des bicyclettes stationnaires dans le cas du SARCOS UniPort [36]) simule très bien les vitesses et les accélérations. Ainsi, pour se déplacer dans un environnement virtuel, il y a quatre éléments à concevoir, soient :

- **la sélection de la direction :**

réfère à la méthode que l'utilisateur utilisera pour naviguer dans une direction particulière (translation et rotation) ou la méthode qui permet de choisir la position désirée du prochain mouvement [37];

- **la sélection de la vitesse et de l'accélération :**

réfère à la méthode que l'utilisateur utilisera pour modifier la vitesse de son déplacement ;

- **les conditions d'entrée :**

réfère aux approches par lesquelles l'utilisateur ou le système fixe le temps de départ, la durée et le temps de fin du mouvement ;

- **la méthode qui simule un environnement infini dans un espace physique restreint :**

réfère au système physique réel qui limite les déplacements dans un environnement infini et aux algorithmes qui permettent de simuler un environnement infini malgré les contraintes physiques.

Templeman a établi certains critères lors du développement d'une technique d'asservissement d'une locomotion virtuelle similaire à une démarche naturelle [38]. Il s'avère utile de diviser les techniques d'asservissement en deux parties : l'action de la consigne faite par l'utilisateur (le choix de la vitesse et de la direction sont deux exemples) et

les effets commandés qui sont générés par l'algorithme du rendu haptique (le rappel au centre de l'interface de locomotion et les forces de réaction des objets virtuels sont deux exemples). Templeman décrit les capacités de simulation d'une démarche naturelle selon les quatre conditions suivantes [38] :

- l'action de la consigne dans l'environnement virtuel doit être similaire à l'action naturelle et doit respecter les propriétés intrinsèques du mouvement (contraintes du mouvement, dépense de l'énergie par l'utilisateur, etc.) ;
- les composantes de l'action de la consigne dans l'environnement virtuel (la direction et la vitesse) devraient interagir entre elles comme le font les composantes de la locomotion naturelle ;
- les actions de la consigne doivent interagir avec les autres actions dans l'environnement virtuel de la même manière que la locomotion naturelle le fait avec les autres actions ;
- les effets commandés doivent être similaires aux effets naturels : la vitesse et la précision du mouvement doivent se compléter et il ne devrait pas y avoir d'effets de bord (comme, par exemple, faire attention de ne pas tomber de la plate-forme).

1.2.1 Problématique conceptuelle

Les humains ont souvent la sensation que la distance parcourue ou la direction empruntée pendant la marche sont meilleures comparativement à la conduite automobile considérant des références différentes au niveaux haptiques et au niveau proprioceptif. Le même phénomène se produit dans un environnement virtuel. En effet, dans chaque application, certains sens prédominent par rapport aux autres. Pour cette raison, dans une application de révision architecturale de bâtiment par exemple, un niveau élevé de la conscience spatiale, la facilité d'utilisation, et la présence pourraient être exigés, tandis que des vitesses élevées de déplacement pourraient être sans importance [39]. Dans les applications où il y a un besoin de simuler la locomotion ou quand l'utilisateur utilise ses mains pour accomplir d'autres tâches, la solution la plus évidente serait d'employer les formes normales de locomotion humaine, comme la marche, pour se déplacer dans le monde virtuel.

En général, la marche et le déplacement sont des activités évoluées très importantes

qui sont considérées comme un comportement naturel chez l'humain. La marche est une fonction fondamentale pour les actions de navigation dans l'espace. Puisque la manière la plus intuitive de se déplacer dans un monde réel est avec les membres inférieurs (les jambes et les pieds), conserver une telle capacité de cette dynamique pour se déplacer à l'intérieur d'un environnement virtuel à grande échelle est d'un grand intérêt pour plusieurs applications exigeant la locomotion, comme l'évaluation architecturale d'édifices, la planification urbaine, l'exploration de terrain, l'entraînement militaire et sportif, etc. Cependant, avec les dispositifs présentement disponibles, la dynamique attachée à une démarche naturelle est rarement conservée. Les mouvements de l'utilisateur sont habituellement restreints par la dynamique des actionneurs et par un petit espace de travail dans le monde réel. Par conséquent, une interface de locomotion conviviale et performante est nécessaire pour permettre certains mouvements sur de grandes distances virtuelles, pendant que l'usager demeure à l'intérieur d'un espace physique relativement restreint [40].

Créer un environnement virtuel à l'intérieur duquel une personne peut évoluer avec un très grand degré de réalisme est très complexe. Une interface de marche naturelle permet à un utilisateur de se déplacer dans un environnement virtuel tout en utilisant ses sens tels que la vue, l'ouïe, le toucher, la proprioception et les informations provenant du cortex vestibulaire comme le montre le tableau 1.1 [2]. La vue et la proprioception sont les deux sens les plus complexes à gérer lors de la modélisation d'un environnement virtuel. Entre autres, les images qui défilent devant les yeux d'un utilisateur doivent être réalistes, fluides et surtout doivent répondre rapidement et avec précision aux mouvements de l'utilisateur. L'estimation des distances et des dimensions dans un environnement virtuel ont d'ailleurs fait l'objet de plusieurs études [41, 42]. Quand un environnement virtuel limite un des sens lié à la locomotion, comme c'est souvent le cas, l'interprétation de l'environnement peut devenir imprécise et même les tâches simples peuvent devenir complexes. Bien qu'une interface de locomotion soit utilisée, il y a donc une forte possibilité que le niveau de performance des utilisateurs ne soit pas le même que dans le monde réel considérant les contraintes et la nature des environnements virtuels [43].

Dans ce contexte, deux critères principaux doivent guider la conception d'une interface de locomotion : **l'exactitude de la commande** et la **demande cognitive**. L'interface de locomotion idéale facilitera les mouvements rapides sur de grandes distances sans sacrifier la précision de la commande et devra être transparente à l'utilisateur [44].

Tableau 1.1: Informations sensorielles [2]

Modalité	Structure	Paramètres
Vision	Rétine	λ , luminescence, contraste
Vestibulaire	Canaux semi-circulaire, utricule et saccule	Inclinaison, accélération, vitesse
Musculaire	Corps des muscles	Position, force, direction et vitesse
Articulaires	Capsule articulaire	position et mouvement articulaire
Tactile	Peau pileuse et glabre	Intensité, vitesse et accélération

La transparence est importante dans le sens où les tâches reliées à l'interface de locomotion doivent être automatiques et non conscientes (conditions rarement atteintes avec les interfaces actuelles). L'interface de locomotion demandera alors un minimum d'apprentissage à l'utilisateur.

1.2.2 Problématique architecturale

L'architecture de ce type de système est très critique lors du développement d'une application de simulation de réalité virtuelle. D'abord, un système physique doit être réalisé pour permettre à l'utilisateur de se déplacer dans un environnement virtuel. La mécanique associée doit posséder des caractéristiques favorisant une démarche naturelle et des mouvements libres. Par la suite, un système logiciel (ou plus particulièrement un servocontrôleur) doit asservir la mécanique suivant les contraintes physiques de l'environnement virtuel. Ainsi, l'architecture globale comprenant le logiciel, l'électronique et la mécanique doit éliminer les contraintes réelles et faire ressortir les contraintes virtuelles, comme par exemple :

- la friction réelle du mécanisme doit être réduite ou compensée pour que seule la friction générée par le moteur physique de l'environnement virtuel soit ressentie par le marcheur ;
- l'inertie et le poids réel du mécanisme doivent être éliminés ou compensés pour que le mécanisme soit transparent sous les pieds ;
- la dynamique de la mécanique et la bande passante du système d'acquisition doivent être suffisamment élevées afin de favoriser des mouvements naturels lors de la marche et

- la sécurité logicielle et matérielle ne doit pas perturber la marche ou diminuer les performances globales de l'interface de locomotion.

De cette manière, une interface de locomotion performante se traduit par un mécanisme transparent, un logiciel adapté à la mécanique, un système d'acquisition adapté à la dynamique de la marche humaine et une sécurité adéquate. Ces contraintes de conception permettent à un utilisateur d'expérimenter les contraintes générées par le moteur physique inclus dans un simulateur temps-réel.

Le concept de cette architecture englobe un ensemble de décisions prises sur des aspects principaux comprenant l'organisation d'un système logiciel, du choix des éléments structuraux et de leurs interfaces qui composent le système, du comportement structural des éléments selon leurs interactions, de la composition de ces éléments structuraux et comportementaux, ainsi que du modèle architectural qui guide cette organisation. L'architecture du système proposé est élaborée dans le chapitre 3 suite à une revue de la littérature présentée au chapitre 2.

1.3 Évaluation des interfaces de locomotion

Les interfaces de locomotion sont composées d'au moins deux systèmes haptiques qui permettent à l'utilisateur de se déplacer dans le monde virtuel. Dans la plupart des cas, le déplacement n'est pas une fin en soi. En effet, il est utilisé simplement pour déplacer l'utilisateur dans un lieu où il peut effectuer d'autres tâches plus importantes. Donc, la technique de déplacement devrait être facile d'utilisation (intuitive), demander un minimum d'apprentissage et ne devrait pas être un obstacle aux autres tâches.

L'utilisation d'un banc d'essai serait un choix approprié pour évaluer la qualité de la navigation dans les environnements virtuels pour les plates-formes de marche. Le banc d'essai permet d'évaluer la technique d'interaction de la locomotion et non l'environnement virtuel au complet. Il est donc nécessaire de trouver des critères qui ne tiennent pas en considération toutes les composantes de l'environnement et les facteurs externes. Le banc d'essai doit aussi tenir en compte des variables indépendantes affectant l'utilisabilité et la convivialité.

En outre, pour évaluer une technique, il est nécessaire de mener les expérimentations avec un système qui prend en compte les mêmes paramètres. Des paramètres différents du système pourraient entraîner des résultats différents dans l'évaluation des critères choisis. Les paramètres sont, entre autres, la technique de détection de collision, la latence et les rendus (haptique, visuel ou de la locomotion). D'autres paramètres d'expérimentation peuvent influencer les résultats dont les caractéristiques de la tâche à l'étude (physique choisie qui modélise l'interaction avec les objets virtuels), de l'environnement virtuel (nombres d'obstacles) et de l'utilisateur (âge, habilité spatiale et expérience) [45].

Les critères d'évaluation de la qualité de la navigation doivent se baser sur la performance et l'efficacité de la technique. La taxonomie des interfaces de locomotion et les facteurs externes qui peuvent influencer la performance sont utilisés pour l'évaluation du *framework*. Cette taxonomie est définie à la prochaine section.

1.3.1 Taxonomie de l'interface de locomotion

Une étude de la taxonomie permet de diviser une interface de locomotion en quatre composantes comme le montre la figure 1.1 : la mécanique, le système d'acquisition et d'asservissement, la sécurité et les conditions d'entrées. D'un autre côté, une taxonomie d'interaction entre l'humain et la machine est présentée dans [46].

L'objectif est de construire un environnement virtuel qui minimise l'apprentissage nécessaire pour son opération, et maximise l'information transmise lors de l'expérience virtuelle. L'utilisation d'une interface de locomotion a pour principal objectif de réduire la courbe d'apprentissage d'un nouvel utilisateur. Dans le cas des plates-formes de marche, les systèmes haptiques sont les pieds virtuels qui sont liés mathématiquement à la plate-forme physique. Le mouvement des pieds dicte la vitesse et l'accélération du corps et donc du point de vue dans l'environnement. Un déplacement précis du point de vue en fonction du mouvement des pieds augmente le confort et la présence de l'utilisateur. D'abord, une modélisation adéquate des pieds doit être réalisée puisque ceux-ci sont les premiers à interagir directement avec l'environnement virtuel. En effet, une modélisation concise permet de définir un modèle d'une trajectoire périodique qui servira à ajuster les paramètres de l'asservissement. Contrairement aux métaphores

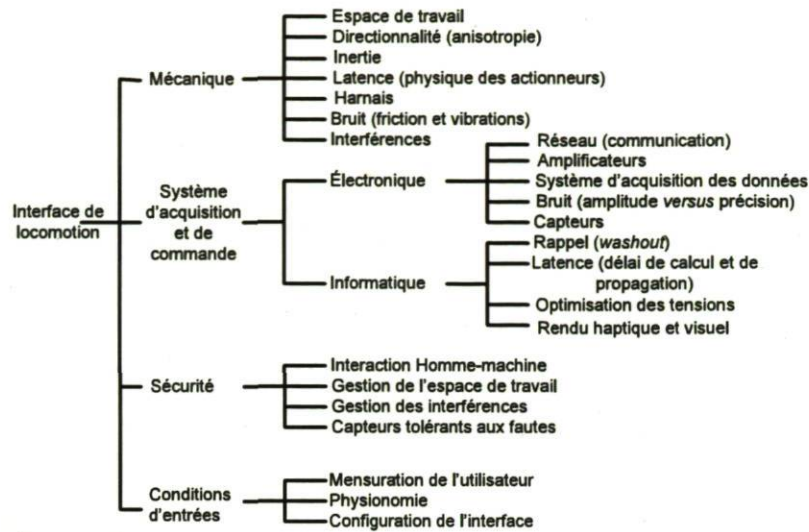


Figure 1.1: Taxinomie des interfaces de locomotion pour un environnement virtuel immersif

de conduite et de poursuite, l'interface de locomotion offre une métaphore naturelle. L'évaluation doit donc porter sur le réalisme du déplacement dans l'environnement. Ainsi, les paramètres physiques de la démarche dont la pose (position et orientation) et la vitesse sont des considérations très importantes de modélisation.

1.3.2 Facteurs de qualité et mesure des performances

Pour les analyses et la conception d'un système de locomotion, il existe un ensemble de facteurs de qualité ou de métriques de performance. Les facteurs de qualité à l'étude sont des caractéristiques mesurables de la performance d'une technique de déplacement. Ces facteurs sont utilisés dans toutes les applications de réalité virtuelle. Puisqu'il est généralement impossible d'obtenir un optimum de tous les facteurs et que certains d'entre eux sont antagonistes, ils doivent être priorisés en fonction des besoins et des spécifications minimales à obtenir. Une liste de critères subjectifs, non exhaustive, pourrait inclure :

- proprioception ou conscience spatiale (connaissance implicite de la position et de l'orientation des membres du corps dans l'environnement pendant et après le

déplacement) ;

- la facilité d'apprentissage (l'habilité d'un utilisateur novice à maîtriser la métaphore ou plus particulièrement la technique de marche) ;
- la facilité d'utilisation (la complexité ou la charge cognitive de la technique) ;
- la présence (sensation d'immersion dans l'environnement virtuel) ;
- le modèle de collecte d'informations (la capacité de l'utilisateur d'obtenir activement l'information de l'environnement pendant le déplacement) et
- le confort (absence de malaise comme les nausées, soit le *cybersickness*).

D'un autre côté, la liste des critères objectifs pourrait inclure :

- le choix de la vitesse et de l'accélération ;
- l'exactitude du déplacement (proximité de la cible désirée et précision de l'interaction).

Pour une interface de locomotion, ces critères ne sont pas suffisants. De manière plus concise, une interface de locomotion devrait permettre selon Poulin [3] :

- un déplacement dans un environnement virtuel impliquant une dépense d'énergie par l'utilisateur ;
- un déplacement naturel omnidirectionnel (dans quatre DDL) dans un environnement virtuel vaste tout en étant contraint dans un espace réel réduit ;
- de garder les mains libres ;
- de recréer un déplacement naturel et
- de recréer la géométrie et les paramètres physiques des objets virtuels avec un moteur de physique adéquat.

Les critères d'évaluation généraux se basent donc davantage sur les spécifications fonctionnelles d'utilisation comme le montre la taxonomie de l'interface de locomotion (section 1.3.1). Les objectifs mesurables sont :

- le nombre de degrés de liberté des mouvements (marcher, tourner, monter, descendre, pas de côté, croisement des jambes) ;
- la manoeuvrabilité (action de sauter, de courir, de se pencher, de se déplacer à genoux, de ramper, etc.) ;
- le degré de réalisme des mouvements ;

- la capacité de reproduire des terrains variables (simulation des forces variables du sol) : escalier, pente, etc. ;
- la capacité de reproduire des caractéristiques de la matière (maléable, déformable ou infiniment rigide) avec différentes textures : sable, glace, béton, eau, etc. ;
- la simulation d'obstacles (murs, portes, etc.) ;
- les performances du système mécanique et électrique : force maximale supportée, inertie, puissance consommée, espace de travail, largeur de bande, etc.
- la facilité d'entretien, de nettoyage, et de réparation ;
- la complexité de réalisation ;
- la complexité de l'asservissement et de la mise en oeuvre du logiciel ¹ ;
- la latence (le délai de la communication, le délai du calcul, la fréquence d'échantillonnage) ;
- les bruits parasites (sonore et électronique) générés par le dispositif et
- la sécurité du système mécanique, de l'électronique et du logiciel.

1.3.3 Qualité de la navigation

Au-delà des soucis d'ergonomie, soit de l'adaptation adéquate de l'interface à l'humain, la sécurité, qui s'exprime par l'absence de danger pour un utilisateur, doit être un souci permanent des concepteurs. L'évaluation de la sécurité est une donnée que les industriels ont l'habitude de manipuler et dont les principaux éléments se réfèrent à des normes [47]. Ce critère est très souvent négligé dans la littérature sur les interfaces de locomotion en réalité virtuelle malgré les mécanismes complexes à asservir et la puissance fournie par les actionneurs. La conception d'un système sécuritaire pourrait influencer la qualité de la navigation. Par exemple, un système qui empêche les pertes d'équilibre ajoute des obstacles dans l'environnement réel qui ne sont pas représentés dans l'environnement virtuel.

Outre la sécurité, la manoeuvrabilité, le degré de liberté des mouvements et le degré de réalisme sont des critères qui assurent la qualité de la navigation. La manoeuvrabilité est le critère qui devient le moins important des trois considérant les avancées technologiques actuelles. Évidemment, tout dépend de l'application pour laquelle l'interface

1. L'implémentation du logiciel lors de la phase finale d'élaboration du système et son implantation dans un ordinateur géré par un système d'exploitation temps réel

est dédiée. Le degré de réalisme du mouvement est le plus important puisqu'il est directement responsable de l'immersion dans l'environnement virtuel. Finalement, si la technologie le permet, une interface de locomotion devrait avoir au moins quatre degrés de liberté (avant-arrière, monter-descendre, de côté, tourner) et l'interface haptique doit être entièrement contrainte dans l'espace. La latence de l'interface est un problème particulier qui affecte plusieurs performances. En effet, la latence affecte directement la manoeuvrabilité et le degré de réalisme des mouvements en plus de la stabilité haptique. Une latence élevée impose à l'utilisateur une charge cognitive supplémentaire à celle de l'environnement virtuel. Dans ce cas, un utilisateur doit apprendre à marcher avec l'interface. La facilité d'apprentissage et d'utilisation sont donc des critères lors de l'évaluation. Ces critères sont difficiles à évaluer objectivement puisqu'il faut tester tant des experts que des novices qui seront soumis à une évaluation subjective. Cependant, l'étude de la biomécanique donne des spécifications fonctionnelles d'évaluation objective sur le degré de réalisme des mouvements. Un degré de réalisme élevé devrait donc diminuer l'apprentissage. Le travail de conception de la géométrie de l'interface de locomotion utilisé dans le cadre de cet ouvrage considère quelques-unes de ces spécifications [33].

Une tâche d'évaluation pourrait être la manipulation avec les pieds d'un ballon virtuel rigide sans déformation. Avec deux utilisateurs oeuvrant dans un environnement virtuel partagé via un réseau, un ballon doit être échangé avec le plus de fidélité possible. Une appréciation objective qui peut évaluer l'ensemble des critères se définit par les mesures physiques et physiologiques qui entrent en considération lors du déplacement du ballon avec les pieds. Aussi, les délais et les pertes des données sur le réseau peuvent être évalués. Dans le cas de pertes de données, une prédiction et une interpolation entre les données sont généralement utilisées. Un modèle physique est nécessaire pour la comparaison des forces calculées par celui-ci et par le module de prédiction. Les items qui pourraient être utilisés pour évaluer l'interface de locomotion sont donc [48] :

- la vérification des retours de force (retour d'effort ou de torseur) à partir d'un modèle par rapport au délai du réseau ;
- l'estimation de l'erreur de positionnement suite à une prédiction de la position du ballon et du pied et
- l'estimation de l'erreur de la position de la caméra par rapport aux pieds.

Les mesures physiologiques pour évaluer la présence emploient l'électromyographie

(EMG), l'électrocardiographie (ECG) et le mouvement oculaire. Ces mesures sont effectuées dans une classe spéciale d'environnements virtuels (ceux prévus pour créer des changements physiologiques discernables chez les utilisateurs). De tels environnements offrent des sensations oculaires, physiques et sonores comme une baisse abrupte et soudaine du plancher. Les sensations produites doivent créer des changements physiologiques tels qu'une augmentation de la fréquence cardiaque et une diminution de la résistance de la peau.

L'interface de locomotion est considérée performante dans le cas où :

- les malaises sont inférieurs aux techniques de déplacement comme dans les métaphores de conduite ;
- les limitations du système sont peu apparentes ;
- l'interface permet le transfert de performances vers le monde réel dans le cas d'un entraînement et
- l'interface offre une alternative aussi fiable et moins dispendieuse que l'entraînement traditionnel.

Nécessairement, le dimensionnement des actionneurs et de l'interface est directement lié à la masse de l'utilisateur et des forces qui sont impliquées lors de la démarche. Ce dimensionnement établira l'inertie du système, la puissance de consommation et l'espace de travail requis. Un petit espace de travail peut occasionner des problèmes de perception lors de la navigation. Dans l'interface de locomotion, le choix de la vitesse et de l'accélération dans le monde virtuel est directement relié aux mouvements des pieds de l'utilisateur. L'évaluation de ces critères porte donc sur la commande de la position de l'utilisateur dans le monde réel. Peu importe le système mécanique qui simule un environnement infini dans un espace physique restreint et qui assure à l'utilisateur de demeurer dans l'espace de travail du mécanisme, la perception du mouvement absolu dans le monde réel doit être minimisée. Pour éviter de ressentir le déplacement vers le centre de l'interface de locomotion lors du rappel, il est nécessaire d'ajuster l'espace de travail en fonction des seuils de perception de l'accélération et de la vitesse (provenant des canaux semi-circulaires, de l'utricule et du saccule). Ainsi, l'évaluation se base sur la vitesse et l'accélération relatives imposées à l'utilisateur lors du rappel vers le centre de l'interface de locomotion.

Pour remédier aux problèmes de perception lors du rappel, Hollerbach, Christensen et Vijayakar proposent plusieurs solutions. Considérant les limitations mécaniques du tapis roulant SARCOS, l'ajout d'un harnais est utilisé pour simuler les accélérations

initiales [49], les pentes [50] et les escaliers [51] avec des forces dorsales de rétroaction. Le harnais est aussi utilisé lors des virages dans certaines applications [52].

Les autres facteurs de qualité, dont la conscience spatiale et la cueillette d'information, concernent davantage l'environnement virtuel seul. Ces deux facteurs ne sont donc pas utilisés pour évaluer le mécanisme de la locomotion haptique dans l'environnement.

1.3.4 Problème de perception et de malaises

La plupart des gens sont sensibles au mal de mer induit par des mouvements périodiques du corps mais aussi par certains déroulements d'images. L'apparition du *cybersickness*² remonte à l'introduction des premiers simulateurs de vol en 1957 [53]. Selon Burdea [47]³ qui se base sur une étude réalisée par Dizio et Lackner en 1992 [54], les causes exactes des malaises demandent une compréhension au-delà des mécanismes perceptuels connus. En 2002, Nichols donne la même conclusion :

« Whilst empirical research has established that participants may experience sickness as a result of VR use, it is not yet clear exactly what causes the symptoms, probably because of the interactive nature of the influential factors » [55].

L'équilibre humain est géré par le système nerveux à partir des informations recueillies par quatre capteurs principaux : l'oeil, l'oreille interne (dont le saccule et les canaux semi-circulaires), la colonne vertébrale et les pieds. La stimulation seule des canaux semi-circulaires ou du vestibule peut causer des nausées.

Les informations fournies par ces quatre capteurs doivent être en concordance. Lors du déplacement dans un environnement virtuel par une métaphore de navigation usuelle (ex : *steering*), l'environnement visuel perceptible est en mouvement. Cependant, le système vestibulaire piloté par l'oreille interne ne perçoit aucun déplacement. Cette non-concordance peut entraîner des malaises, des nausées ou des vomissements. Les symptômes sont très variables d'un utilisateur à un autre et il est presque impossible

2. En français : *cyber-malaises*

3. Volume p.254

de les prédire.

Dans ce cas, une interface de locomotion et un environnement virtuel doivent :

- respecter les dimensions virtuelles et réelles ;
- produire un mouvement virtuel identique au mouvement réel, c'est-à-dire tous les mouvements de l'utilisateur, simulant le mouvement réel, doivent être reproduits d'une manière similaire dans l'environnement virtuel ;
- utiliser des métaphores naturelles et
- fournir des rétroactions (vestibulaire et kinesthésique entre autres) aux sens de l'utilisateur, c'est-à-dire l'interface de locomotion et l'environnement virtuel doivent augmenter le niveau de présence de l'utilisateur par une stimulation multisensorielle.

1.3.5 Méthodes de réduction des malaises

Puisque technologiquement, il n'est pas possible de concevoir une interface de locomotion et un environnement virtuel qui permettent de satisfaire les exigences énoncées au paragraphe précédent, il faut trouver des solutions pour diminuer le *cybersickness*. Le *cybersickness* s'ajoute aux autres maux bien connus comme le mal de l'air, le mal de la mer et le mal de l'espace. Quelques caractéristiques cliniques permettent de distinguer chacun d'eux [1]. Évidemment, pour proposer des solutions viables à ce problème, il faut connaître les causes pour ensuite les traiter dans la conception du système. Cette dissertation va donc proposer des éléments de solution partiels selon la littérature actuelle. Bien que LaViola [56] démontre que les causes des symptômes ne sont pas bien connues, il propose quelques méthodes pour en réduire l'impact. Il y a trois théories principales pour expliquer le *cybersickness* : la **théorie des conflits sensoriels**, la **théorie de la position** et la **théorie de l'instabilité posturale** [56]. LaViola propose quatre solutions pour réduire le *cybersickness* :

– Mouvement des plates-formes

Selon la théorie de conflit sensoriel, si quelqu'un éprouve un malaise dans un environnement virtuel, celui-ci est dû à un conflit entre les systèmes visuels et vestibulaires. Ainsi, une idée pour réduire le *cybersickness* était d'ajouter

des plates-formes de mouvement au simulateur. En faisant ainsi, l'utilisateur dans l'environnement virtuel obtiendrait la stimulation vestibulaire et la stimulation visuelle. Malheureusement, dans beaucoup d'expériences les gens éprouvent toujours des malaises même avec la plate-forme de mouvement supplémentaire à la simulation.

– **Stimulation vestibulaire directe**

Une autre possibilité pour réduire le *cybersickness* est d'employer la stimulation vestibulaire directe. Cette idée est semblable au concept des plates-formes de mouvement mais au lieu d'employer une grande base en mouvement, l'utilisateur porte un dispositif qui envoie des signaux électriques au 8^{ème} nerf crânien pour duper le système vestibulaire. Ce mécanisme simule des accélérations ou des accélérations angulaires. Actuellement, personne n'a encore utilisé ce dispositif dans le contexte de la réduction du *cybersickness*.

– **Armatures de repos ou *Rest Frame***

Le concept des armatures de repos est basé sur la perception spatiale des humains pour les objets stationnaires dans la stabilisation de la posture. Par conséquent, une armature de repos est simplement une armature particulière qu'un observateur donné prend pour être stationnaire. En termes de *cybersickness*, s'il y a une difficulté à trouver une armature de repos cohérente, il y a une grande possibilité que l'utilisateur devienne malade. James [57] utilise un VGA (*Virtual Guiding Avatar*) pour réduire les malaises. Le mouvement du VGA suit le mouvement de l'arrière-scène (*background*). Le VGA est présenté à la figure 1.2.

– **Adaptation**

Un programme d'adaptation consiste à augmenter graduellement le temps d'exposition d'un utilisateur aux simulations de réalité virtuelle. En outre, des tâches qui exigent des valeurs élevées d'accélération ou d'accélération angulaire devraient être graduellement travaillées afin d'adapter les systèmes vestibulaires et visuels. Les stratégies d'adaptation semblent toujours être les meilleures méthodes pour la réduction du *cybersickness*. Hill [58] a évalué cette méthode. La procédure d'adaptation a semblé donner de bons résultats.

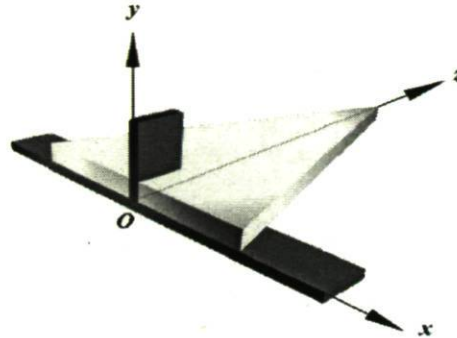


Figure 1.2: *Virtual Guiding Avatar*

1.4 Système global définissant l'interface de locomotion

De façon à bien préciser la définition du projet, le système est tout d'abord analysé en l'isolant de son environnement extérieur. Dans le diagramme de contexte, le système n'est, pour l'instant, défini que par l'interface de locomotion basée sur un mécanisme qui relie un utilisateur à l'environnement virtuel. Le diagramme physique et le diagramme des fonctionnalités sont définis dans le chapitre 3 et se basent sur une analyse de la littérature présentée au chapitre 2. Dans un premier temps, la figure 1.3 présente le diagramme de contexte. Les entrées du système, présentées à la section 1.4.1, sont à gauche tandis que les sorties, présentées à la section 1.4.2, sont à la droite.

1.4.1 Les entrées du système

Les entrées peuvent être séparées en deux classes distinctes. Les **entrées paramétriques** qui définissent l'ensemble de l'interface de locomotion et de l'utilisateur et les **entrées mesurées** qui proviennent des consignes ou des intentions de l'utilisateur. Les **entrées paramétriques** sont définies avant même que le système soit en fonction. Entre autres, ces paramètres sont la position des enrouleurs suite à l'étalonnage de la géométrie, les mensurations de l'utilisateur, les longueurs initiales des câbles, les dimensions des deux plates-formes, les paramètres (ou les coefficients des filtres utilisés dans la boucle de rétroaction) des FPID qui assurent l'asservissement du mécanisme par

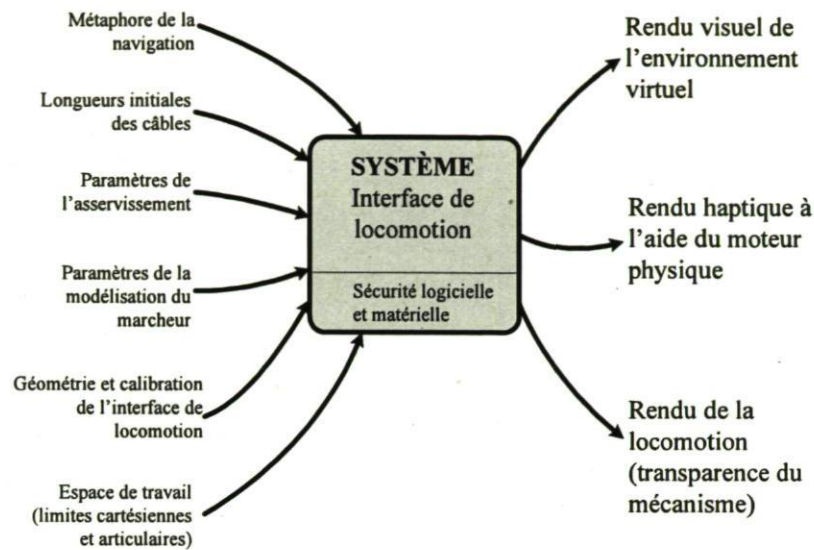


Figure 1.3: Diagramme de contexte de l'interface de locomotion

une commande articulaire ou cartésienne, etc. L'espace de travail est aussi un paramètre d'entrée important puisqu'il définit l'ensemble des poses qu'une plate-forme peut prendre tout en conservant un équilibre statique et dynamique. En effet, les plates-formes ne doivent en aucun temps quitter cet espace lorsqu'il y a un contact avec le monde virtuel puisque l'asservissement n'y sera pas possible. Une situation particulière se produit lorsque la plate-forme se positionne sur son socle de calibration au démarrage ou à la fin de l'application. Dans ce cas très particulier, une commande articulaire en position est nécessaire puisque l'algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions pourrait ne pas trouver de solution à l'extérieur des limites de l'espace de travail. Aussi, bien qu'un asservissement articulaire en position soit appliqué, l'équilibrage de la plate-forme n'est pas garanti. Dans tous les autres cas, une commande articulaire en tension dans les câbles est appliquée.

Les **entrées mesurées** ne sont pas considérées comme une entrée au système, mais sont plutôt intrinsèques à celui-ci. Celles-ci sont perçues par deux capteurs d'efforts (soit le couple comprenant les forces et les moments) placés sous les pieds du marcheur et par des jauges de déformation qui mesurent les tensions dans les câbles. Les efforts mesurés sur un capteur permettent de déterminer le couple à appliquer aux moteurs pour déplacer l'effecteur d'une position à une autre. Dans le cas de l'analyse du mouvement de l'utilisateur dans l'interface de locomotion et du rappel (la méthode qui simule

un environnement infini dans un espace physique restreint), le mouvement des pieds est considéré soit comme une perturbation (lors d'une commande en impédance ou en torseur inertiel nul) ou soit comme une consigne (lors d'une commande en admittance) à l'entrée système. Les capteurs d'efforts et les poses résultantes des deux effecteurs permettent d'ajuster la direction et la vitesse de l'usager dans l'environnement virtuel.

Au niveau de l'asservissement articulaire, le capteur de tension dans les câbles est utile pour obtenir une commande optimale et pour éviter la modélisation de la friction et des pertes dans le mécanisme. Ce capteur permet de linéariser une partie de l'enrouleur et de l'amplificateur. Cette mesure de la tension sera utile lors du calcul de la distribution optimale des tensions dans les câbles et lors de la gestion des interférences entre les câbles. En effet, la mesure précise de la tension dans un câble permettra d'augmenter la transparence et l'efficacité du mécanisme. Le risque de n'utiliser qu'une commande en courant se traduit par une variation entre l'effort réel appliqué à la plateforme et l'effort commandé. Cette variation pourra être ressentie par l'utilisateur et ne permettra pas un équilibrage statique du mécanisme.

Finalement, d'autres entrées indéfinies intrinsèques peuvent être ajoutées. Entre autres, un casque de réalité virtuel qui mesure la position de la tête afin d'afficher le rendu visuel permet d'augmenter la présence. Il serait aussi possible de définir des interfaces haptiques pour les mains et pour le harnais dorsal. Ces interfaces haptiques, comme pour les pieds, ont leurs propres capteurs et leurs actionneurs afin de produire un rendu haptique réaliste.

1.4.2 Les sorties du système

Le système global d'une interface de locomotion, qui doit être mise en oeuvre dans le cadre de ces travaux de recherche, peut être représenté par la figure 1.4. Cette figure, **qui constitue la contibution majeure de cette thèse**, est le résultat final de la conception de la plateforme logicielle haptique (soit le *framework* haptique) de l'asservissement, de la régulation, du simulateur de la physique par la mise en oeuvre d'un moteur physique temps-réel, de la gestion de la sécurité et de la calibration de l'interface de locomotion haptique. Entre autres, elle montre les trois sorties directrices (les rendus de la locomotion, haptique et visuel) du diagramme de contexte présenté à

la section 1.4 ainsi que les contributions secondaires constituées des blocs sous le rendu haptique. D'ailleurs, les contributions secondaires regroupent les travaux effectués dans **l'asservissement de l'interface de locomotion** (chapitres 4, 5 et 6) et dans le **simulateur de la physique** (chapitres 7 et 8). D'autres sorties peuvent être définies comme le rendu olfactif et le rendu sonore, mais ces rendus ne sont pas couverts dans cet ouvrage.

D'un premier côté, le **rendu de la locomotion** inclut les trois mécanismes haptiques (les deux plates-formes et le harnais dorsal qui pourraient être nommées interfaces haptiques), l'affichage de l'environnement virtuel et l'algorithme de rappel qui maintient le marcheur dans le centre de l'interface de locomotion. D'un autre côté, le **rendu haptique** contient l'asservissement des mécanismes haptiques tout en considérant la physique qui doit être rendue au marcheur. La sécurité (logicielle et matérielle) agit sur ces deux sorties et l'algorithme décisionnel, qui active un degré de sécurité dans l'asservissement du mécanisme, est représenté par un losange. Puisque le mécanisme possède des câbles comme moyen de transmission des couples générés aux moteurs, des interférences (des croisements) entre les câbles peuvent survenir. La gestion de ces interférences est un des niveaux de sécurité qui constitue une section de l'asservissement. Enfin, le **rendu visuel** communique avec le rendu haptique par une interface de communication reliant les deux moteurs physiques. L'intersection du rendu haptique et du rendu visuel procure un simulateur performant et fiable pour le calcul de la physique.

Il faut noter que la communication bidirectionnelle entre les deux moteurs physiques pourrait occasionner un retard sur le rafraîchissement affectant ainsi la performance ou la stabilité du rendu haptique. Cette constatation explique la raison de la mise en oeuvre d'un algorithme de calcul des forces (problème d'optimisation des forces) qui sont appliquées entre un mécanisme haptique et l'objet virtuel. L'objectif est de simuler immédiatement les efforts (comme la friction) entre le mécanisme et l'objet virtuel selon les contraintes fournies avec un retard. En plus de ce problème qui peut être partiellement résolu par la division du moteur physique, deux autres sources d'instabilité peuvent être rencontrées :

- la stabilité d'interaction entre l'humain et l'interface haptique (sans contrainte avec l'environnement virtuel lorsque le mécanisme haptique est libre de se déplacer dans l'espace) et
- la stabilité d'interaction avec l'environnement virtuel (avec une contrainte entre

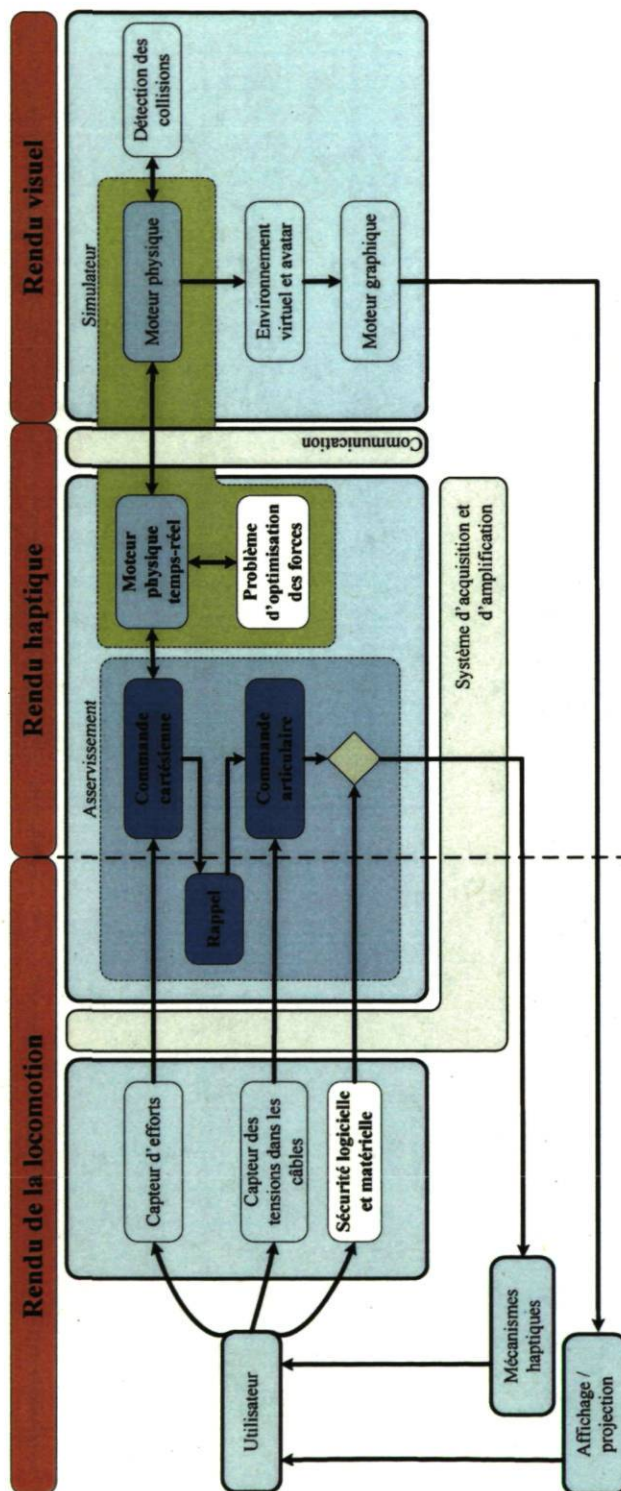


Figure 1.4: Système global définissant l'interface de locomotion

le mécanisme haptique et l'objet virtuel qui limite le mouvement d'au moins un degré de liberté du mécanisme).

L'origine du problème provient de la possibilité que l'humain ou le moteur physique injectent de l'énergie dans l'asservissement du mécanisme qui n'est pas dissipée ou qui est accumulée dans la boucle de rétroaction. Il est donc nécessaire d'inclure, comme un second niveau de sécurité, un observateur de la stabilité qui maintient l'asservissement du mécanisme dans son domaine de stabilité. Bien que cet aspect ne constitue pas une contribution, la sécurité affecte la conception du système et une attention particulière y est accordée.

Finalement, en ce qui concerne le harnais dorsal, il est utilisé comme une interface haptique, soit en entrée pour connaître la position du centre de masse de l'utilisateur et en sortie pour appliquer des forces de rétroaction. Ce harnais ne sera pas couvert dans cet ouvrage. Plusieurs travaux dans la littérature montrent son utilité pour la sécurité de l'utilisateur et pour augmenter le réalisme de la simulation d'un déplacement lorsque la dynamique de la métaphore de navigation n'assure pas la consigne envoyée par l'utilisateur.

1.5 Structure de la thèse

Le système destiné à l'interface de locomotion proposé dans cette thèse est un mécanisme parallèle entraîné par des câbles qui relie deux dispositifs haptiques, un pour chaque pied, à des actionneurs (enrouleurs motorisés) comme le montre la figure 1.5. Idéalement, ce type de mécanisme devrait inclure un harnais de sécurité actif et une sangle d'armature qui sont, tous les deux, attachés au centre de masse de l'utilisateur pour maintenir l'équilibre et simuler certaines contraintes dans l'environnement virtuel comme le montre la figure 1.6. Un harnais actif ne sera pas inclus dans cet ouvrage puisqu'il nécessite du matériel supplémentaire qui n'a pas été prévu lors des étapes de préconception. En contre partie, un mécanisme passif à un degré de liberté (entraîné par deux câbles) sera plutôt utilisé.

L'interface de locomotion est constituée de trois systèmes principaux : le mécanisme physique qui contient les capteurs et les actionneurs (le mécanisme robotisé entraîné

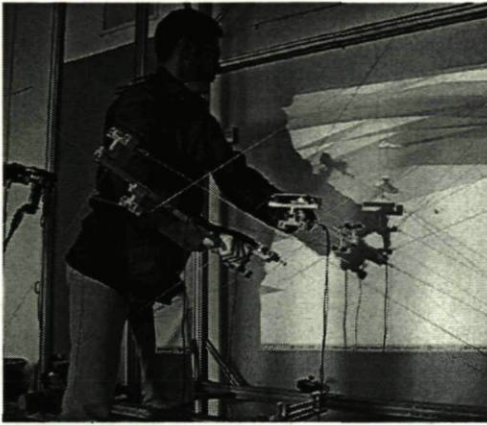


Figure 1.5: Les deux plates-formes du mécanisme parallèle entraîné par des câbles avec l'écran de l'environnement virtuel [7]



Figure 1.6: Harnais actif (mécanisme dans le dos) et sangle d'armature passive sur le *SARCOS* [8]

par des câbles), l'environnement virtuel qui génère le rendu visuel et le rendu haptique ainsi qu'un système d'asservissement (un servocontrôleur avec une interface de communication) qui commande le mécanisme. Les travaux présentés dans cette thèse consistent à trouver des solutions les plus simples et logiques aux problèmes de l'asservissement du mécanisme de l'interface de locomotion avec l'interaction de la physique d'un environnement virtuel. Considérant l'avancement du projet, les objectifs directeurs et terminaux des travaux de recherche sont :

- l'intégration finale et la mise en oeuvre du système complet à échelle réduite 1 : 3 et
- la simulation de l'interface de locomotion à l'aide d'un robot humanoïde de marque Kondo pour interagir avec les objets virtuels afin de fournir un démonstrateur technologique fonctionnel.

Afin de présenter l'intégration pratique et théorique du projet, cette thèse se divise en trois sections. Une première section (chapitres 2 et 3) est consacrée à l'analyse du domaine d'étude et à la proposition d'une solution pour l'application de cet ouvrage, une autre section (chapitres 4, 5 et 6) étudie la commande optimale du mécanisme selon l'approche proposée et la dernière section (chapitres 7 et 8) propose une solution d'intégration à l'environnement virtuel et à l'analyse des résultats fournis par l'approche proposée. La figure 1.7 illustre la structure logique de la thèse.

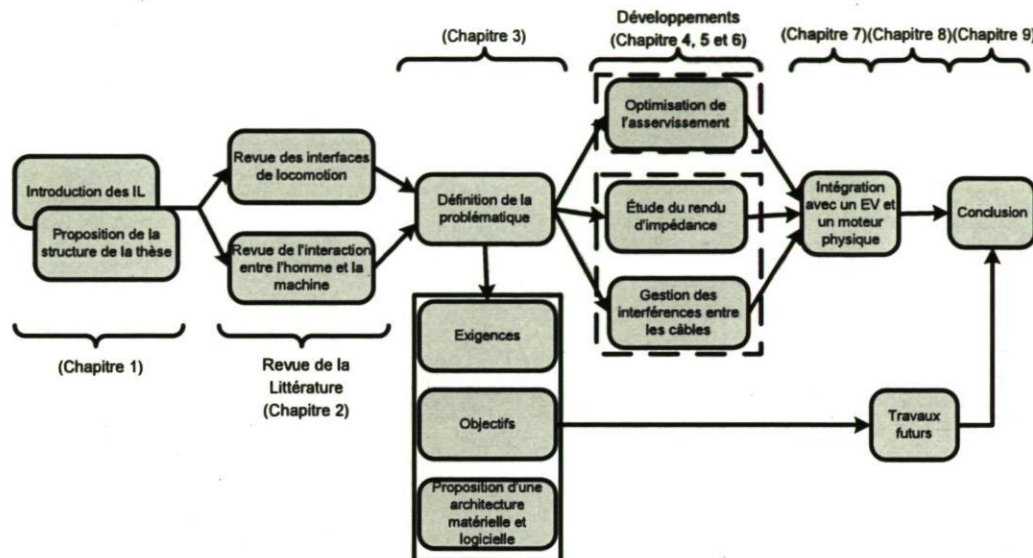


Figure 1.7: Structure de la thèse

Le chapitre 2 présente une revue de la littérature des interfaces de locomotion qui couvre l'essentiel des technologies présentement disponibles. Ce chapitre constitue une source d'information utile lors de la détermination d'un mécanisme original selon les contraintes et les spécifications fonctionnelles d'une marche naturelle dans un environnement virtuel.

Par la suite, l'architecture innovatrice de l'interface de locomotion choisie sera présentée avec le cahier des charges au chapitre 3. Le cahier des charges est développé en considérant les spécifications fonctionnelles liées à une marche naturelle. Par conséquent, une étude sur la dynamique de la démarche humaine est présentée préalablement.

Cette architecture logicielle introduite dans la section 1.4.2 est subdivisée en quatre chapitres qui représentent le développement du système asservi. Le premier concerne un algorithme d'optimisation qui sera utile pour calibrer l'ensemble du mécanisme. Le deuxième se rapporte à la commande optimale articulaire du mécanisme qui ajuste la tension et la longueur des câbles. Le troisième étudie le comportement du câble en incluant la possibilité d'interférences entre ceux-ci. Finalement, le dernier élabore

sur la méthode d'intégration des deux plates-formes avec un retour d'efforts provenant d'un moteur physique temps-réel fonctionnant de paire avec un second moteur physique inclut dans l'environnement virtuel.

Chapitre 2

Les interfaces de locomotion

En premier lieu, ce chapitre présente une revue de la littérature des interfaces de locomotion présentement utilisées dans des environnements virtuels. Une attention particulière est portée aux systèmes omnidirectionnels qui peuvent simuler un sol à géométrie variable. De nombreuses applications sont présentées avec les technologies innovatrices utilisées dans chacun des projets. En deuxième lieu, une description des applications est élaborée pour situer les choix de conception.

2.1 Introduction

Les interfaces de locomotion se limitent souvent à des contraintes mécaniques qui empêchent l'utilisateur de se déplacer naturellement sur un terrain virtuel à géométrie variable. En effet, les mécanismes possèdent généralement beaucoup d'inertie et ils ne sont pas en mesure de reproduire exactement et avec précision la géométrie du monde virtuel. Ceci limite grandement la vitesse de réaction de l'interface ce qui restreint les déplacements spontanés et diminue la sensation d'immersion de l'utilisateur.

L'objectif principal des travaux de recherche présenté dans cette thèse est de concevoir une interface visant un éventail d'applications dont notamment la réadaptation et l'entraînement dans un environnement virtuel. Plus spécifiquement, les objectifs portent sur l'intégration de trois systèmes (mécanique, électrique et logiciel) qui forment un tout efficace avec peu d'inertie et respectant différentes contraintes de conception. Entre autres, le système doit répondre à une démarche lente et naturelle de l'usager dans un contexte où la dynamique du mécanisme n'est pas suffisante et qu'il y a des délais de télécommunication entre le servocontrôleur et la physique de la réalité virtuelle.

L'interface de locomotion doit être originale et innovatrice, c'est-à-dire que l'ensemble des algorithmes utilisés doit apporter des contributions significatives. Ce chapitre présente une revue de littérature qui couvre l'essentiel des technologies disponibles pour les interfaces dans l'objectif d'améliorer les concepts présentés. L'intérêt croissant de la conception de mécanismes dédiés à la réadaptation et à l'entraînement a eu une influence directe sur la quantité d'articles dans ce domaine. D'une part, seuls les systèmes pouvant simuler un terrain à géométrie variable sont analysés en profondeur. D'autre part, un bref survol des autres types d'interfaces de locomotion est présenté. À ce sujet, des compilations plus exhaustives sont disponibles dans [3] et [59]. Finalement, l'idée de l'interface de locomotion entraînée par des câbles a été brevetée en 2007 [60]. Les brevets ne seront d'ailleurs pas détaillés dans ce chapitre.

2.2 Revue de littérature sur les interfaces de locomotion

Cette revue présente les différentes interfaces réalisées par les groupes de recherche académiques et quelques entreprises. Ces interfaces sont présentées en fonction de leurs caractéristiques mécaniques. On rencontre généralement deux types d'interface de locomotion dans les environnements virtuels : passif ou actif. Les interfaces de déplacement passives comprennent généralement une commande sans inertie (périphériques comme les *joysticks*) et ne nécessitent pas de propulsion de l'utilisateur. Dans cette catégorie, l'exemple le plus courant est un système mécanique avec inertie comme une plateforme de Gough-Stewart pour les simulateurs de vol ou les simulateurs de conduite automobile. D'un autre côté, les systèmes actifs possèdent généralement une interface de déplacement commandée avec les membres de l'utilisateur et avec la physique de l'environnement virtuel ainsi qu'un système de projection actif comme les appareils HMD (*Helmet Mounted Display*) ou une chambre de type CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*). Dans les systèmes actifs, l'utilisateur doit lui-même se propulser à l'aide d'une métaphore de déplacement.

Cette revue est divisée selon les techniques actives utilisées pour l'actionnement de l'interface afin de permettre à un utilisateur de se mouvoir dans un environnement virtuel tout en demeurant dans un espace réel restreint. Les prochaines sections introduiront brièvement les objectifs, les contraintes et les différentes technologies utilisées dans ce domaine.

2.2.1 Marche sur place et interface de glissement

En premier lieu, les interfaces dite de *marche en place* ont comme principaux objectifs la simplicité, la facilité de transport par leur faible masse et la facilité d'exploitation sur un ordinateur conventionnel. Elles ont d'abord été conçues pour éviter les pièces en mouvement et les systèmes de mesures associés qui éliminent le déplacement de l'utilisateur. D'ailleurs l'utilisation d'un seul port USB est requis pour le fonctionnement de certains appareils. Les capteurs de pression sous les pieds permettent à l'ordinateur de calculer, par un algorithme de reconnaissance de patrons, différentes variables

relatives au comportement de marche de l'utilisateur comme la direction de marche, la vitesse, les sauts, etc [40, 61]. James Templeman, du centre NRL, a exposé une technique (*Gaiter*) pour mesurer et analyser les mouvements des jambes directement pendant la marche ou la course en place (VR99). Le *Gaiter* permet de suivre les pieds par un capteur de pression placé à l'intérieur des chaussures et de suivre les genoux par des capteurs électromagnétiques [38]. Les désavantages sont nombreux si l'objectif est de recréer une démarche naturelle. Entre autres, le mouvement du corps est similaire à un déplacement normal sans la propulsion, donc sans la sensation proprioceptive du déplacement. De plus la direction est commandée comme pour la conduite automobile : l'utilisateur doit revenir en avant pour continuer à avancer en ligne droite.

En deuxième lieu, les *interfaces de glissement* sont des systèmes omnidirectionnels qui permettent une démarche à l'intérieur d'un environnement restreint. En effet, un anneau est positionné autour de l'usager pour limiter sa position et pour servir de point d'appui. Le marcheur peut donc changer de direction dans l'anneau. Un dispositif de glissement omnidirectionnel (comme des patins à roues ou des sandales en caoutchouc) est attaché au pied pour lui permettre de tourner librement. Le mouvement des pieds est mesuré par des capteurs magnétiques pour mettre à jour l'image du monde virtuel [62]. Une amélioration a été réalisée sur ce système par l'ajout d'actionneurs pour éliminer la sensation de friction sous chacun des pieds. En effet, chaque pied est utilisé comme effecteur d'un mécanisme parallèle plan actionné à l'aide de quatre câbles comme le montre la figure 2.1. Ce système actionné avec des câbles, nommé *StringWalker*, permet de maintenir l'utilisateur dans le centre géométrique de l'anneau. De plus, les rotations sont rendues possible grâce à une plaque tournante qui déplace les moteurs et non l'utilisateur (voir figure 2.2) réduisant ainsi les problèmes de proprioception [9].

Il semble que l'utilisation d'un mécanisme entraîné par des câbles a plusieurs avantages [63]. Premièrement, contrairement aux architectures sérielles pour lesquelles toutes les erreurs aux articulations s'additionnent, les erreurs aux articulations d'un mécanisme parallèle se moyennent. Deuxièmement, les câbles permettent une amplitude de mouvement très grande par rapport aux transmissions plus couramment utilisés, comme dans un mécanisme à barres (obtenu par exemple avec un agencement de vérins ou d'un système hydraulique sur des pivots), et ils occupent un espace de très faibles dimensions lorsqu'ils sont enroulés sur un enrouleur cylindrique. Ensuite, les câbles étant utilisés en tension uniquement, ceux-ci sont, pour une même tâche, beaucoup plus légers que la plupart des transmissions conventionnelles : ils ajoutent ainsi une

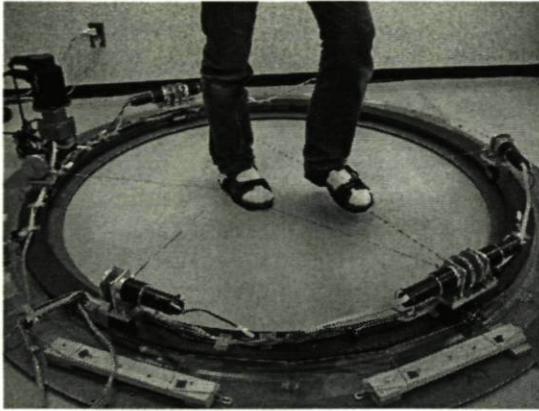


Figure 2.1: Principe du fonctionnement mécanique du *String Walker* [9]

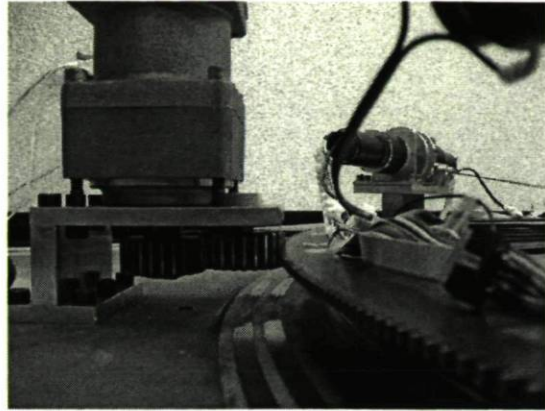


Figure 2.2: Anneau rotatif des actionneurs du *String Walker* [9]

inertie presque négligeable aux systèmes qui nécessitent des grandes accélérations. Ils sont souples et ils permettent une gestion des interférences (contact entre les câbles). Cependant, puisque les câbles travaillent en tension seulement, il est nécessaire d'avoir une redondance d'actionnement pour assurer une commande cartésienne dans les 6 DDL [64]. Bien qu'augmenter le nombre d'actionneurs soit complexe à gérer dans les algorithmes d'asservissement, la redondance d'actionnement réduit les lieux de singularités à l'intérieur de l'espace de travail et améliore potentiellement la distribution de l'énergie dans les actionneurs. Une alternative possible à la redondance d'actionnement est l'utilisation de liens passifs (ressort et câble à tension constante sont deux exemples) qui peuvent compenser l'unilatéralité d'actionnement [65]. Un des plus grands désavantages du mécanisme à câbles est la vibration de ceux-ci lors de l'actionnement à haute vitesse. Les vibrations peuvent être réduites en exploitant une commande en force ou une commande prédictive en utilisant l'élasticité non-linéaire du mécanisme [66]. Un autre désavantage provient de la rigidité structurelle du mécanisme qui dépend de la rigidité du câble et des tensions appliquées sur la plate-forme [67]. En effet, la rigidité maximale que le mécanisme peut reproduire ne dépend pas uniquement de la rigidité de l'enrouleur et de la structure qui maintient cet enrouleur.

2.2.2 Plate-forme programmable

Dans le simulateur de champ de bataille du projet de NPSNET, un dispositif à pédales (*UniPort*) est employé pour la locomotion [68]. La force de contre-réaction,

provenant du moteur physique et appliquée sur les pédales, est utilisée pour simuler des pentes. La métaphore de déplacement de cet unicycle est de pédaler plutôt que de marcher. Les utilisateurs peuvent se déplacer vers l'avant ou vers l'arrière, et peuvent tourner de gauche à droite. Selon les résultats obtenus, la direction du mouvement, commandée par son siège, est inconfortable. Les petits mouvements et les manoeuvres d'évitement des obstacles sont presque impossibles à exécuter [17].

Dans la même catégorie, les plates-formes programmables pour les pieds permettent de simuler des terrains à géométrie variable. Elles représentent une amélioration combinée de la marche sur place et du système à pédalier. Plusieurs chercheurs travaillent actuellement dans ce domaine dont Roston [69], Haanpaa [70], Iwata (*GaitMaster*) [10], Schmidt (*Haptic Walker*) [11], et Yoon avec Ryu (*Virtual Walking Machine*) [71]. Ces interfaces de locomotion permettent à l'utilisateur de marcher sur un terrain variable (sable, boue, glace, etc.), de monter des escaliers, des terrains en pente et ainsi de suite. Chaque plate-forme (dispositif haptique) pour les pieds a généralement six degrés de liberté (DDL).

Dans le cas de l'appareil de Roston, durant une opération normale, l'opérateur restera toujours en contact avec les deux plates-formes. Celles-ci ont une dimension considérable pour faciliter des mouvements comme le crawl, la marche, etc. Un mécanisme vertical est ajouté pour que l'opérateur puisse interagir avec des obstacles réels comme un mur, une fenêtre ou une porte [69, 72].

D'un autre côté, Iwata a développé deux mécanismes différents pour le *Gait Master* qui est constitué de deux plates-formes avec six degrés de liberté chacune. Le mouvement de la plate-forme est réalisé avec un pantographe. Un degré supplémentaire est ajouté par une table tournante pour permettre à l'utilisateur de tourner librement. Plusieurs versions du *Gait Master* existent dont une version est constituée d'un mécanisme où le nombre de degrés de liberté est réduit pour permettre uniquement une marche vers l'avant [10]. Contrairement à l'appareil de Roston, les plates-formes sont en contact avec les pieds uniquement lorsque le pied touche au sol du monde virtuel (figure 2.3). Les plates-formes demeurent en contact avec le sol du MV mais restent toujours sous les pieds de l'utilisateur. Le système de positionnement des pieds est réalisé avec trois élastiques et des jauges de déformation entre le pied et la plate-forme. La mesure de la position a un retard de 0.3 seconde, ce qui est non négligeable. Un algorithme d'asservissement s'assure que l'utilisateur est toujours dans le centre de l'ap-

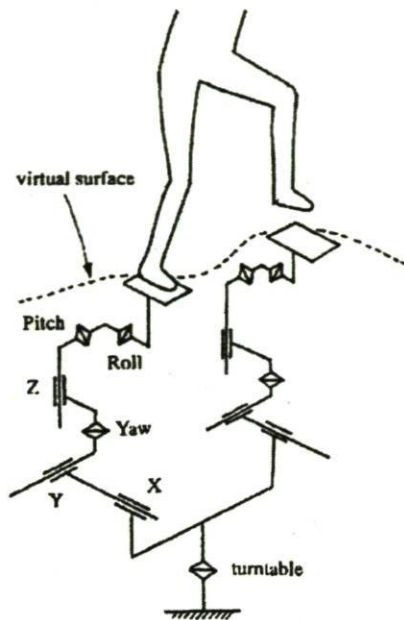


Figure 2.3: Principe du fonctionnement mécanique du *GaitMaster* [10]

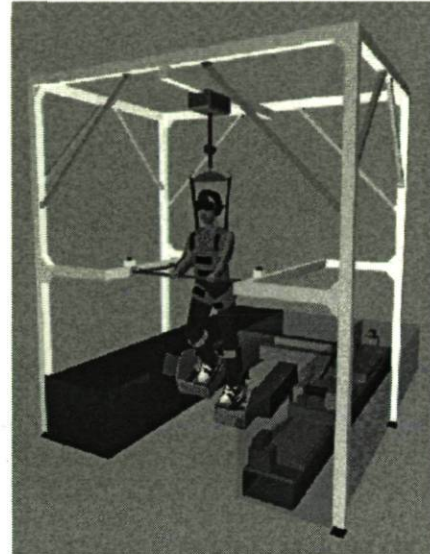


Figure 2.4: Système complet du *Haptic Walker* de Schmidt [11]

pareil par rapport à son centre de masse, et ce, dans toutes les directions possibles. La table tournante est ajoutée pour suivre les rotations et les changements de direction selon le demi-angle entre les deux pieds. L'aire de travail maximale des plates-formes est de 80 cm horizontalement et de 20 cm verticalement. La vitesse maximum est de 1.5 m/sec. Cette conception est réalisée pour une marche lente normale [10]. Iwata a d'ailleurs travaillé sur plusieurs autres projets dont le *Torus* [34], le *CirculaFloor* [22] et le *Virtual Perambulator* [62].

Schmidt propose un robot d'entraînement unidirectionnel pour les personnes en réadaptation qui considère plusieurs aspects au niveau du traitement d'une personne qui a perdu la faculté de marcher (figure 2.4). Ces plates-formes programmables pour les pieds ont deux avantages pour la réadaptation [11] :

- les pieds sont guidés précisément pendant toutes les phases de la démarche contrairement à un tapis roulant : des trajectoires artificielles d'entraînement peuvent être programmées en fonction de la pathologie à traiter ;
- l'entraînement est possible dans plusieurs environnements de marche : seules les plates-formes programmables à six DDL peuvent réellement diagnostiquer une

pathologie et aider à une réadaptation complète par la programmation d'une trajectoire à poursuivre et

- l'asservissement de six DDL assure la possibilité d'une interaction avec des objets virtuels en mouvement.

Dans le cas de ce système, il y a cependant deux désavantages majeurs, communs à la majorité des interfaces de locomotion basées sur des plates-formes programmables ou des tapis roulants :

- le système est volumineux et
- il n'est pas possible d'asservir directement ni les genoux, ni les hanches contrairement au LOKOMAT [73].

D'une part, le mécanisme proposé dans la première version du système de Schmidt repose sur une cinématique hybride série-parallèle. Les deux plates-formes à 6 DDL peuvent suivre des trajectoires à une vitesse maximum de 5 km/h. Il est actionné avec deux moteurs électriques linéaires se déplaçant sur un rail commun. Chaque plate-forme est attachée au bout de l'effecteur d'un bras mécanique. Ainsi, les positions horizontale et verticale dépendent des moteurs linéaires et la position angulaire dépend de la configuration du bras robotisé [74].

D'autre part, le servocontrôleur et le système de gestion est implanté sur un système d'exploitation Linux/RTLinux. Il inclut le calcul de la trajectoire par une interpolation basée sur une série de Fourier qui contient la position, la vitesse et l'accélération selon l'équation 2.1 [75] :

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)). \quad (2.1)$$

L'interpolation est réalisée à partir d'un cycle du mouvement du pied pré-établi comme le montre les figures 2.5 et 2.6. Ces figures ont été capturées avec le système d'acquisition de mouvement ultrasonique ZEBRIS. Le mouvement en 3D est projeté dans le plan sagittal puisque tous les mouvements principaux se produisent dans ce plan. De ces figures, les spécifications de l'espace de travail nécessaire peuvent être dérivées incluant les valeurs pointes des vitesses et des accélérations en translation et

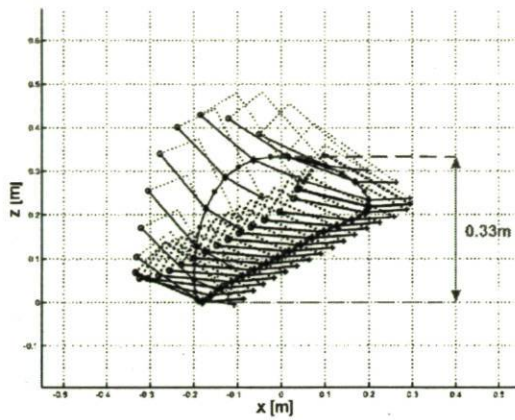


Figure 2.5: Cycle associé au mouvement d'un pied pour monter des escaliers avec un rappel de la position [12]

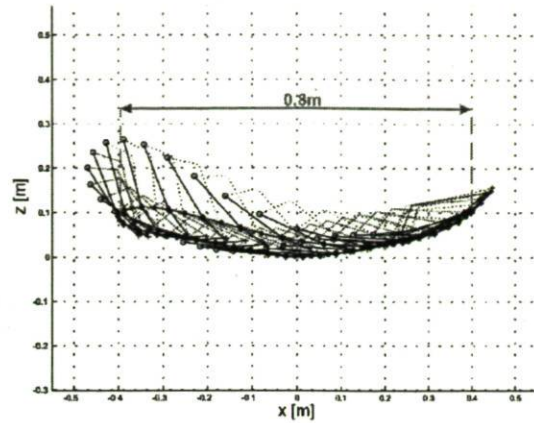


Figure 2.6: Cycle associé au mouvement d'un pied pour marcher sur une surface plane [12]

en rotation de la plate-forme. Le joint rétrocapital est choisi comme point de référence pour le pied. De ces données, l'IL est conçue avec les spécifications minimales suivantes : $\Delta x_{min} = 0,9 \text{ m.}$, $\Delta z_{min} = 0,4 \text{ m.}$ et $\Delta \phi_{min} = 135^\circ$.

La commande est hybride sur la force, l'impédance et la position pour assurer une bonne manoeuvrabilité tout en annulant l'inertie du système. Un deuxième ordinateur avec un système d'exploitation *MS Windows* est connecté via un port Ethernet avec le protocole UDP. Le GUI, sur cet ordinateur, synthétise et affiche les trajectoires désirées pour la réadaptation avec une série d'outils de visualisation 2D et 3D. Les coefficients de Fourier de référence sont calculés en temps différé (hors-ligne) à la suite du choix de certains paramètres de la trajectoire par l'opérateur. Le logiciel développé assure un suivi du mouvement des pieds. Dans un premier temps, la trajectoire des pieds est pratiquement forcée. En effet, le système s'assure que les mouvements des pieds suivent une trajectoire naturelle avec un maximum de précision sur la position et la vitesse. Avec la progression du patient, l'entraînement devient de moins en moins supervisé par le servocontrôleur [75].

Un effort considérable est en progression pour la réduction de la taille et de la masse des systèmes de locomotion pour être éventuellement utilisés dans les maisons. Cette réduction ne se fait cependant pas sans contraintes. Entre autres, Yoon a développé un mécanisme de 3 DDL par pieds, comme le montre la figure 2.7, dont certains mouvements sont contraints [13]. Le mécanisme repose essentiellement sur le mouvement

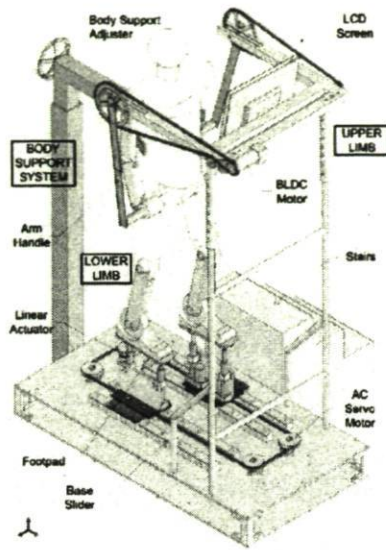


Figure 2.7: Interface de locomotion actionnée avec des courroies de distribution [13]

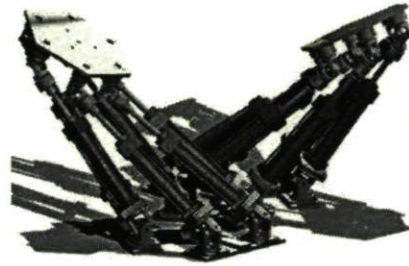


Figure 2.8: Interface de locomotion actionnée avec des plates-formes de Gough-Stewart [14]

des courroies de distribution attachées à une plate-forme pour le pied. Aussi, de nouveaux prototypes utilisent des mécanismes parallèles d'actionnement avec des vérins hydrauliques tels que les plates-formes de Gough-Stewart. Dans le cas d'un groupe de recherche du Pérou, les deux mécanismes sont utilisés pour l'analyse de la démarche avec un asservissement des 6-DDL (voir la figure 2.8) [14]. Un autre système très similaire a été développé en même temps à l'Université Stanford avec un asservissement de seulement quatre DDL par pied [76]. D'autres prototypes de ce type ont été développés pour la réalité virtuelle [77].

2.2.3 Tapis roulant

Les systèmes étudiés jusqu'ici offrent des possibilités de locomotion très développées pour différentes applications mais demandent des installations coûteuses et complexes. En contrepartie, le tapis roulant est un système simple pour la marche virtuelle, principalement pour l'entraînement. L'objectif principal est d'éliminer le déplacement de l'utilisateur par un mouvement en sens inverse de un ou de plusieurs tapis. La première difficulté est de réguler correctement la vitesse du tapis pour éviter que l'utilisateur ne

perde l'équilibre. Dans la majorité des cas, la vitesse est ajustée à celle du mouvement du marcheur [16]. La difficulté de mesurer la vitesse de déplacement provient de l'analyse de la démarche et du délai entre chaque phase de la marche. La seconde difficulté provient du changement de direction de l'utilisateur sur le tapis.

Certaines applications ont été développées à l'UNC avec un appareil nommé *Walk-through* [78]. Ce tapis roulant est muni d'un volant similaire à celui d'une bicyclette. Le marcheur peut changer de direction dans l'EV par la consigne de ce volant. Un système similaire a été développé à l'Université de Tokyo où l'utilisateur est placé dans un dôme virtuel [79].

Le *Treadport* [80], développé à l'Université de l'Utah, est le successeur de l'*Uniport* présenté à la section 2.2.2. Son objectif initial était de surmonter les difficultés liées à l'*Uniport*. Le *Treadport* est un tapis roulant standard sur lequel l'utilisateur est attaché par derrière avec un harnais (*tether*) ajusté à la taille. L'attachement mécanique à six axes procure une rétroaction (force d'inertie) des accélérations et des pentes du monde virtuel (MV) dans le monde réel (MR). Il permet aussi de calculer la position et l'orientation de l'utilisateur comme un goniomètre. La plus récente version peut simuler l'inclinaison d'un plancher. L'amélioration principale du dispositif par rapport à l'*Uniport* est qu'il permet aux utilisateurs de marcher ou de courir au lieu de pédaler. Cependant, il ne résout pas tous les problèmes associés à l'*Uniport*. En effet, les utilisateurs doivent tourner leur bassin et leur taille pour indiquer la direction du mouvement. Le mouvement physique est contraint à une seule direction et les mouvements désirés sont maladroits s'ils ne sont pas dans la direction du tapis roulant [17].

2.2.3.1 Tapis roulant ATLAS/GSS

Le centre de recherche ATR (*Advanced Telecommunications Research Institute*) a développé un tapis roulant omnidirectionnel monté sur une plate-forme à trois axes de mouvement (figure 2.9). L'appareil, nommé *Atlas* (*ATR Locomotion interface for Active Self motion*), a comme objectif d'éliminer l'apprentissage de l'utilisateur à la marche [15]. La rotation est réalisée en pivotant le tapis roulant dans la direction de la marche et est basée sur des techniques de mesures visuelles de la position de pied avec des réflecteurs passifs pour l'infrarouge [81]. Sur la figure 2.9, les réflecteurs sont nommés *Pr* et *Pl*. La vitesse maximale de rotation est de 1 rad/sec. L'*ATLAS* peut aussi simuler des pentes positives et négatives dans toutes les directions. Il y a cependant des

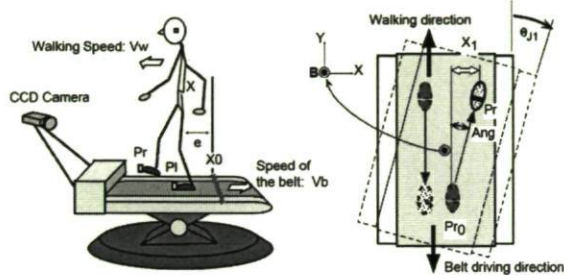


Figure 2.9: Principe du fonctionnement mécanique de l'ATLAS [15]

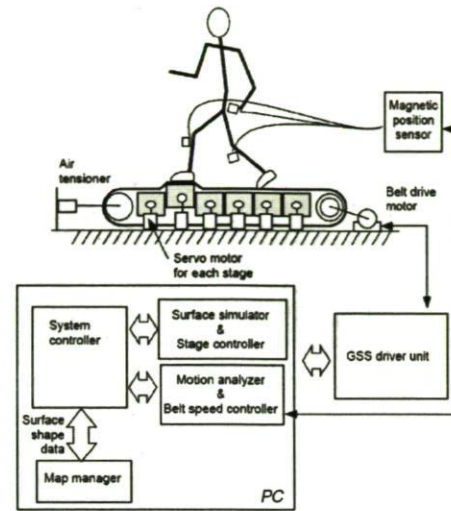


Figure 2.10: Paliers à mouvement vertical du GSS [16]

décalages dans la rotation dus à l'inertie du système.

Le simulateur de la surface du sol (*Ground Surface Simulator ou GSS*) utilise un choix de six paliers à mouvement vertical qui déforment la ceinture pour recréer un terrain inégal (figure 2.10). La surface de la géométrie est très limitée : seuls des déplacements de sections (de dimensions fixes) verticales sont possibles. La vitesse maximale du tapis avec le GSS est de 2,3 m/sec. Aussi, la montée maximale de chaque palier est de 6 cm [16]. Jusqu'à ce jour, aucune publication ne démontre l'intégration du *GSS* et de l'ATLAS.

2.2.3.2 Tapis roulant ODT

Les ODT incluent tous les tapis roulants qui permettent d'asservir la position d'un marcheur à son centre. De nombreuses versions ont été développées après le brevet déposé par David E. E. Carmein en 1996 [82]. Mécaniquement, le tapis roulant ODT (*Omni-Directional-Treadmill*) de Carmein est constitué de deux tapis roulants perpendiculaires agencés l'un dans l'autre. Les deux tapis (celui du haut et du bas) sont asservis par leur propre servo-moteur (figure 2.11).

L'ODT est constitué de 3400 rouleaux séparés et tissés ensemble. Le mouvement du tapis inférieur est transmis au marcheur par les rouleaux. Ce mécanisme permet une

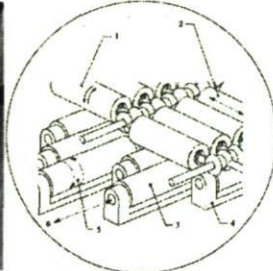


Figure 2.11: Principe de fonctionnement du ODT [17]

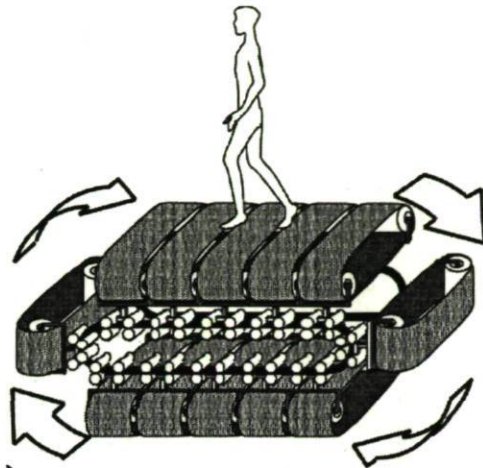


Figure 2.12: Principe du fonctionnement mécanique du *Torus* [18]

marche omnidirectionnelle. La vitesse de marche maximum permise par le système est de 2 m/sec. Il a une capacité réelle de deux fois cette vitesse mais il a été sous-sollicité pour des buts expérimentaux et pour aider à prolonger la vie du système.

L'ODT répond aux mouvements et aux manoeuvres de l'utilisateur avec ses actionneurs. Pour des raisons de sécurité, l'utilisateur porte un harnais qui prévient les chutes lors des pertes d'équilibre. Un mécanisme est utilisé pour localiser la position et l'orientation de l'utilisateur relativement à la plate-forme. Quand l'utilisateur s'écarte du centre de l'ODT, les servomoteurs ramènent l'utilisateur vers le centre.

Ce système a plusieurs problèmes non résolus jusqu'à présent dont le bruit causé par la friction des tapis et des rouleaux, la manoeuvrabilité et la latence. Premièrement, l'utilisateur doit apprendre à marcher sur l'ODT. En effet, le plus grand problème consiste à exécuter de petits mouvements. Toutes les fois que les utilisateurs essayent de manoeuvrer, comme tourner sur place ou exécuter des pas de côté, l'ODT répond aux utilisateurs et essaye de les reconduire au centre. Même s'il n'y a aucun mouvement associé à un déplacement réel, l'ODT génère une réponse pouvant occasionner une perte d'équilibre. Un autre grand problème est la latence (temps de réponse) du système par rapport aux accélérations brusques. Si l'ODT ne peut pas suivre le mouvement de l'utilisateur, une déviation d'alignement se produit et les utilisateurs sont déséquilibrés [17].

2.2.3.3 Tapis roulant *Torus*

Le *Torus* est un tapis roulant à deux DDL dans la même catégorie que les ODT. La géométrie choisie pour réaliser cet appareil est un tore comme le montre la figure 2.12. Le principe repose sur la juxtaposition en parallèle de plusieurs petits tapis qui se déplacent latéralement sur un rail. La vitesse maximale de chaque tapis roulant juxtaposé est de 1,2 m/sec. Cette limitation mécanique oblige l'utilisateur à marcher plus lentement que la marche normale. Le mouvement des pieds est mesuré par un capteur magnétique (Polhemus FASTRAK) [18].

Comparé aux autres interfaces de locomotion, le *Torus* a certains avantages. En effet, l'ODT, présenté à la section 2.2.3.2, fournit les mêmes fonctionnalités que le *Torus*, cependant, les petits cylindres tissés avec les ceintures produisent beaucoup de bruit et les vêtements (et même la peau) peuvent se coincer quand l'utilisateur rampe sur la surface. Le tapis roulant *Torus* est exempt de ces problèmes néanmoins, une limitation du système provient de la taille du secteur de marche. Les marcheurs doivent respecter les limites du plancher actif, et ils ne peuvent pas exécuter de grands pas. Pour permettre au marcheur de se déplacer plus rapidement, le plancher actif devrait couvrir un domaine plus large que celui développé ce qui augmenterait l'inertie du système et pourrait ralentir sa réponse [34].

2.2.4 Consortium Européen du projet *CyberWalk*

Plus récemment, un consortium de recherche sous le nom de *CyberWalk* qui regroupe six institutions a été créé afin de réaliser une interface de locomotion qui possède le potentiel de résoudre l'ensemble des problèmes mentionnés dans les sections précédentes. La principale raison de ce projet est l'étude du comportement de la marche humaine en considérant la biomécanique, la perception et la cognition à l'aide d'une interface de locomotion nommé *CyberCarpet*. Un des partenaires, le *Swiss Federal Institute of Technology* (ETHZ), développe un logiciel de simulation d'une ville *CityEngine* [83, 84], pour reproduire un environnement virtuel lors de l'utilisation de ces interfaces de locomotion. Un autre projet, portant le même nom [85, 86] et indépendant du Consortium *CyberWalk*, étudie un système distribué de navigation virtuelle.



Figure 2.13: Le *CyberCarpet* en version ODT [19]

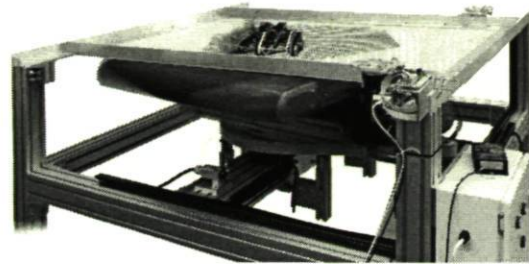


Figure 2.14: Le *CyberCarpet* avec un roulement à billes [20]

Jusqu'à maintenant, ce projet inclut la conception et la réalisation de trois prototypes : 1) un ODT similaire au *Torus* [19], 2) un ODT fonctionnant avec des billes (système de roulement à billes monté sur un tapis roulant comme le montre la figure 2.14) [87, 20] et 3) une interface de locomotion basé sur des plates-formes programmable [88].

Le *CyberCarpet* de la version ODT (voir figure 2.13) a une dimension hors tout de six mètres par six mètres avec une surface active pour la marche de 4.5 mètres par 4.5 mètres avec un poids total de 11 tonnes. Ces dimensions seraient les minimales nécessaire pour reproduire une marche normale, mais des dimensions supérieures procureraient de meilleurs résultats¹. La conception a été achevée pour obtenir une opération douce et sécuritaire. Le système *CyberWalk* utilise des caméras pour suivre la position et la posture de l'individu afin d'asservir la vitesse du tapis roulant [89].

2.2.5 Les autres systèmes

Il existe plusieurs autres interfaces de locomotion qui proposent des artifices mécaniques différents. Cette section ne présente que très brièvement ces systèmes.

1. Des dimensions de 100 mètres par 100 mètres seraient nécessaire pour éliminer la sensation des algorithmes du rappel (soit éliminer complètement la sensation de l'accélération du tapis roulant).

En premier lieu, la *CyberSphere* (figure 2.15) est un système relativement peu intéressant. Le mouvement de marche de l'observateur fait tourner la sphère. Des images produites par un ordinateur, mises à jour en réponse à ce mouvement, sont projetées sur la surface externe de la sphère. L'observateur peut marcher, courir, sauter ou ramper dans n'importe quelle direction. Les rotations de la grande sphère sont transférées à une plus petite sphère secondaire, qui est soutenue au moyen d'un anneau, dans lequel les capteurs de roulement sont montés. Pour considérer un plancher infini, il faut que la sphère soit de très grandes dimensions, soit d'au moins 3,5 mètres de diamètre, ce qui limite ses applications [90, 21]. De plus, cette sphère est à l'intérieur d'une structure qui maintient les projecteurs.

En deuxième lieu, quelques recherches ont relié les gestes de la marche à la locomotion. Choi [91] a développé les *CyberBoots*. Quatre sondes de pression sont installées sous la plante du pied. À la différence des interfaces de marche précédentes, tels que les sondes en disque (capteurs de pression), les tapis roulants et les *steppers* (escalier d'exercice), ce dispositif n'est pas limité dans une position fixe. De plus, la multiplicité de signaux de pression du pied fournit une source de consigne hautement dimensionnelle qui est inhérente à la conception, alors que la modularité des signaux fournit des moyens pour différencier les modèles du mouvement humain. L'identification du modèle a été mise en application en utilisant l'inférence basée sur les règles de la logique floue.

En troisième lieu, Iwata a développé le *CirculaFloor* [22]. Le *CirculaFloor* est constitué d'un ensemble de tuiles qui peuvent se déplacer individuellement pour recréer le sol virtuel (figure 2.16). Le mouvement des tuiles sous les pieds de l'utilisateur élimine le déplacement dans n'importe quelle direction. Cette méthode peut aussi recréer un sol à topologie variable avec les actionneurs linéaires à même chacune des tuiles. Cependant, considérant les dimensions actuelles de chaque tuile, la simulation de la marche est plutôt très approximative. Chaque tuile mesure 568 mm (W) × 568 mm (D) × 92 mm (H) et peut supporter un poids de 80 kg à 1200 mm/sec.

Finalement, Kadobayashi [92] a développé un interpréteur de gestes, appelée *VISTA*, qui détecte visuellement le mouvement de l'utilisateur. Ce système a été conçu pour les expositions dans les musées. Kobayashi [93] a rapporté un dispositif semblable qui mesure la position du centre de l'équilibre par une sonde. Il traduit les gestes en commandes pour se déplacer dans un espace virtuel, ainsi l'utilisateur doit préalablement apprendre comment marcher dans cet espace.

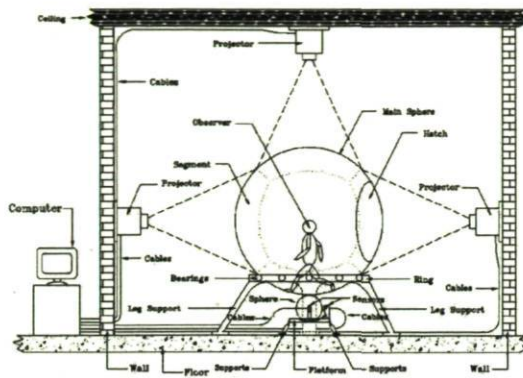


Figure 2.15: Principe du fonctionnement mécanique de la *CyberSphere* [21]

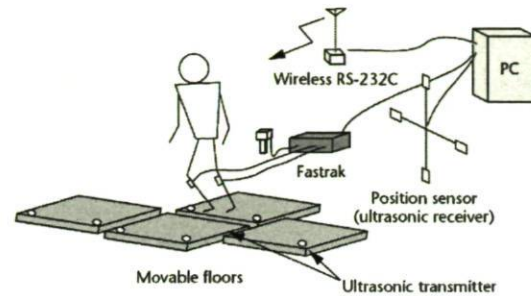


Figure 2.16: Principe du fonctionnement du *CirculaFloor* [22]

2.3 Applications des interfaces de locomotion

Les applications des interfaces de locomotion sont nombreuses. En effet, elles se retrouvent dans plusieurs applications dont l'entraînement militaire [17], la réadaptation [94], les architectures de révision structurée lors de la conception d'édifices (conception virtuelle) [91]. Les autres applications possibles sont l'éducation, le jeu et l'exercice (*arcades*) [40] ainsi que la recherche psychophysique [95]. Cette section présente quelques applications dont le *Tel-E-Merge* et le *HapticWalker*.

Premièrement, Hauro Noma travaille non seulement sur l'interface de locomotion elle-même, mais aussi sur un système, nommé *Tel-E-Merge*, qui permettra à un utilisateur d'être, en temps réel, dans un environnement réel modélisé ou filmé à un autre lieu pour visiter et discuter avec les autres utilisateurs. L'objectif de cette interface est essentiellement touristique [16]. Un robot téléguidé dans un environnement réel, nommé AIR (*ATR Imaging Robot*), est commandé à distance par les déplacements de l'utilisateur dans l'IL ATLAS. En temps réel, AIR transmet à l'utilisateur les informations visuelles et audiophoniques. Ainsi, l'utilisateur a l'impression de marcher dans ce monde réel à distance [81].

Deuxièmement, la restauration d'une démarche normale après un accident vasculaire cérébral, un traumatisme crânien ou un dommage au niveau de la colonne vertébrale, est une partie intégrante de la réadaptation et influence souvent la durée de la période de réadaptation. Les concepts modernes de l'apprentissage moteur favorisent un en-

entraînement spécifique répétitif, c'est-à-dire que, pour réapprendre à marcher, le patient doit s'exercer à marcher avec plusieurs répétitions et d'une manière adéquate [12]. Au niveau clinique, la première limitation avec un tapis roulant, est qu'il faut plusieurs thérapeutes pour assister le mouvement des pieds pour tout le cycle de la démarche. Ce protocole est coûteux et n'est pas efficace. De plus, les sessions d'entraînement doivent être de courte durée puisqu'elles sont très exigeantes envers les thérapeutes, ce qui limite le potentiel du traitement [94]. D'ailleurs, Hidler, avec le *LOKOMAT*, et Schmidt, avec le *HapticWalking*, travaillent sur leurs ILs pour résoudre ces inconvénients. Dans le cas du *LOKOMAT*, certains problèmes demeurent au niveau de la liberté de mouvement de la démarche. En particulier, il limite les mouvements de la jambe dans le plan sagittal et ne tient pas compte de la rotation substantielle de la hanche.

2.4 Applications des mécanismes entraînés par des câbles

Le mécanisme entraîné par des câbles pour la conception du *StringWalker* offre une opportunité intéressante si la géométrie qui est présentée était améliorée. En effet, le *StringWalker* n'est pas en mesure de reproduire des terrains de différentes géométries. Cependant, l'ajout de câbles supplémentaires permettrait à ce système d'être beaucoup plus performant que l'ensemble des autres interfaces de locomotion présentées dans cette revue. Pour cette raison, cette section explore d'autres applications de ce type de mécanisme qui pourra donner des idées d'amélioration sur ce prototype.

Ces mécanismes peuvent être divisés en plusieurs catégories. Dans le cas d'un mécanisme spatial, les catégories peuvent être divisées en fonction de leur géométrie : les mécanismes sous-contraints (ou structure hypostatique dans le cas d'un mécanisme suspendu²), les mécanismes complètement contraints (avec une solution unique puisque la structure est isostatique³) et les mécanismes redondants (qui forment un ensemble de solutions puisque la structure est hyperstatique⁴) [96].

Morizono a développé un système d'entraînement virtuel pour lancer et attraper une

2. En anglais : Incompletely Restrained Positioning Mechanisms (IRPM)

3. En anglais : Completely Restrained Positioning Mechanisms (CRPM)

4. En anglais : Redundantly Restrained Positioning Mechanisms (RRPM)

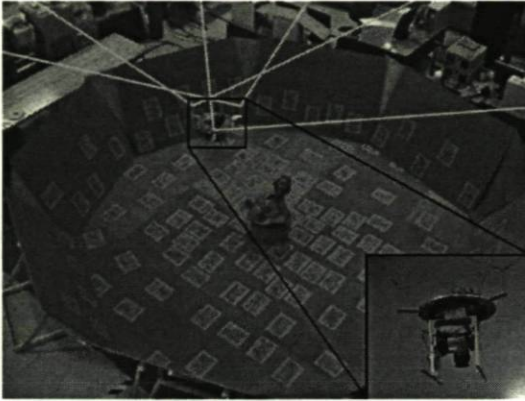


Figure 2.17: Le numériseur d'images 3D [23]

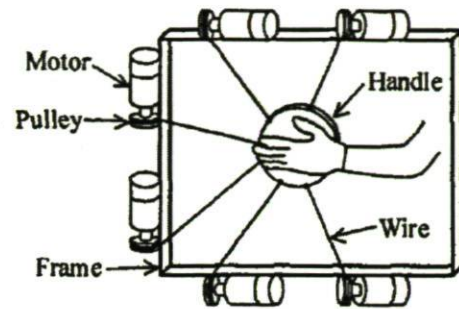


Figure 2.18: Dispositif haptique de Kino [24]

balle virtuelle. L'asservissement n'est effectué que sur le gant par lequel l'utilisateur peut recevoir la balle. Le gant est attaché avec quatre câbles (3 DDL) agencés de manière asymétrique pour éviter les interférences. Les difficultés entourant cette application sont les accélérations et les vitesses très élevées qui sont nécessaires pour lancer ou recevoir la balle. Le mécanisme à câbles doit donc être très rapide et l'environnement virtuel doit avoir un bon taux de rafraîchissement visuel. Le système actuel n'est cependant pas assez performant pour simuler cette tâche (vitesse maximum de $6,2 \text{ m/s}$ et accélération maximum de 85 m/s^2) [97]. D'ailleurs, le robot *FALCON* (*Fast Load Conveyance*) a été construit pour obtenir de très grandes vitesses au niveau de l'effecteur. Le robot atteint des accélérations pointes de $43g$ et une vitesse maximum de 13 m/s , même avec de petits moteurs à courant continu de 60 W [66].

Plusieurs autres applications sont rapportées dans la littérature. Entre autres, Andrew propose un robot actionné par câbles pour interagir dans des environnements risqués dont les sites nucléaires [98]. Aussi, *Skycam*, une caméra aérienne robotisée, permet une mobilité tridimensionnelle de celle-ci pour effectuer des prises de vue en mouvement [99]. Cette dernière application a été améliorée pour le développement d'un numériseur d'images 3D [23] comme la figure 2.17 le montre. Finalement, Kino propose deux types de dispositifs haptiques pour les mains. Le premier est un mécanisme entraîné par des câbles (voir figure 2.18) et le second est une structure avec des joints sériels actionnés par un mécanisme parallèle [24].

Plusieurs études sont réalisées pour étudier les performances de ces mécanismes

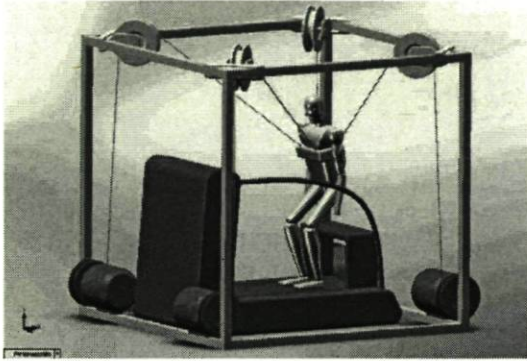


Figure 2.19: Mécanisme de réadaptation pour les membres inférieurs [25]

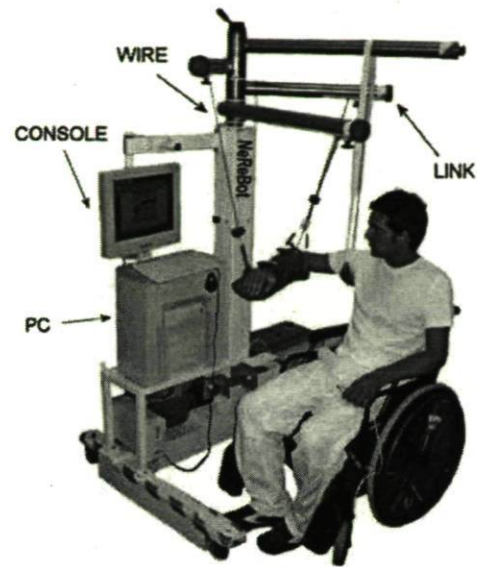


Figure 2.20: Mécanisme de réadaptation pour les membres supérieurs [26]

pour des applications de réadaptation. Un harnais actif a été développé afin d'aider des personnes âgées ou des patients ayant des incapacités aux membres inférieurs à se lever debout ou à s'asseoir. Le patient peut se lever d'une chaise, située sur un tapis-roulant, qui peut, par la suite être utilisé pour la marche comme le montre la figure 2.19 [25]. Un autre système, nommé NeReBot (*NEuro REhabilitation roBOT*), a été développé pour les membres supérieurs (figure 2.20) [26].

2.5 Stabilité d'interaction entre l'humain et une interface haptique

La capacité de l'humain à stabiliser un système instable ou, à l'inverse, à déstabiliser un système stable est un problème courant dans l'asservissement des interfaces haptiques. Deux grandes approches existent dans la littérature pour contourner ce problème. La première consiste à modéliser les muscles de l'humain pour ajuster le modèle de la fonction de transfert du modèle de la loi de commande qui donne les consignes de position à partir des mesures des torseurs (le torseur \mathbf{h}_a est mesuré avec l'aide d'un capteur d'efforts à six degrés de liberté) appliqués sur la plate-forme. Cette méthode

consiste à ajuster la loi de la commande pour veiller à garantir la stabilité du système [100]. L'analyse de la stabilité peut, par la suite, être réalisée avec différentes stratégies comme celle de Routh-Hurwitz, des lieux des racines, de Nyquist, de Lyapunov ou des μ -analyse, parmi plusieurs autres. La seconde approche n'utilise pas de modèle. Elle préfère l'étude des transferts d'énergie dans le système [101]. D'autre part, il existe plusieurs techniques de stabilisation comme celles retrouvées dans le commande adaptative ou robuste. Cette section présente quelques avenues d'une commande optimale stable selon la première approche (avec un modèle de l'humain) ; la seconde sera traitée dans le chapitre 7.

D'un certain point de vue, un des objectifs du servocontrôleur est de minimiser l'effort de l'utilisateur pour déplacer les plates-formes. Le capteur d'efforts sous les pieds est directement responsable du déplacement d'une plate-forme, donc il faut maximiser le gain de boucle pour réduire la masse apparente de la plate-forme. La sensibilité et la précision du capteur d'efforts deviennent donc critiques puisque plus le capteur sera précis et moins il sera sensible au bruit électronique. Donc, le signal pourra être amplifié par le gain de boucle et la plate-forme sera davantage transparente. Ceci n'empêche pas qu'une rétroaction positive de l'humain vienne déstabiliser le système. Pour faciliter le déplacement de la plate-forme et augmenter la vitesse de la réponse transitoire, il faut diminuer l'amortissement pour minimiser l'effort appliqué par l'utilisateur. À des vitesses faibles, la stabilité et le positionnement sont importants. Il faut donc augmenter l'amortissement. De cette manière, la fonction optimale d'amortissement pourrait être une courbe exponentielle qui minimise une fonction de coût sur l'effort, comme le suggère Ikeura [102].

Le servocontrôleur doit être conçu de manière à s'adapter aux caractéristiques des humains. Ikeura démontre que ces caractéristiques peuvent être exprimées par une commande en impédance⁵ selon la figure 2.21. La position de la main \mathbf{x} est calculée selon un torseur appliquée \mathbf{h}_a sur le capteur, donc par l'intégration de l'équation (2.2) :

$$\ddot{\mathbf{x}} = (-\mathbf{C}/\mathbf{M})\dot{\mathbf{x}} + (-\mathbf{K}/\mathbf{M})\mathbf{x} + \mathbf{h}_a/\mathbf{M}. \quad (2.2)$$

5. La théorie des quadripôles démontre qu'il s'agit d'une commande avec un modèle hybride (une matrice d'immittance hybride).

Les paramètres associés à l'impédance \mathbf{M} (inertie de la masse qui agit sur la dynamique), \mathbf{C} (amortissement visqueux ou *damping* qui agit sur l'énergie cinétique du mécanisme) et \mathbf{K} (raideur ou *stiffness* qui agit sur la précision du positionnement) sont déterminés expérimentalement pour améliorer la réponse du mécanisme. Les résultats démontrent que l'inertie et la raideur peuvent être approximées et que l'amortissement est le facteur le plus important dans l'asservissement coopératif [27]. À partir de cette méthode, Ikeura propose une commande *d'impédance variable*⁶ qui est une fonction de la vitesse d'opération. En effet, avec un amortissement faible, il est plus facile d'exécuter des mouvements rapides avec une perte sur la précision de la position ; l'inverse s'applique aussi. À partir des caractéristiques biomécaniques, il y a deux types d'opérations à considérer lors de l'asservissement :

- pour un positionnement précis de l'effecteur, la raideur musculaire est importante, ce qui nécessite une bonne stabilité ;
- pour des mouvements rapides, lorsque le couple d'accélération est élevé, la stabilité est moins importante mais une grande manoeuvrabilité est nécessaire.

Dans la commande variable, l'amortissement devrait être élevé pour obtenir une bonne stabilité et faible pour obtenir une bonne manoeuvrabilité. Le paramètre de la raideur \mathbf{K} , qui agit comme un ressort, entrave l'exécution du déplacement d'un objet. Ce paramètre est donc éliminé de l'équation. Le nouveau système d'équations utilise la vitesse de déplacement \mathbf{v} ($\mathbf{v} = \dot{\mathbf{x}}$) pour modifier les paramètres \mathbf{C} et \mathbf{M} selon l'équation (2.3) [103] :

$$\mathbf{h}_a = \begin{cases} \mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{x}}, & \dot{\mathbf{x}} < \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{M}_2 \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_2 \dot{\mathbf{x}}, & \dot{\mathbf{x}} \geq \mathbf{v}_0 \end{cases} \quad \mathbf{C}_1 > \mathbf{C}_2. \quad (2.3)$$

Le paramètre de l'amortissement visqueux \mathbf{C} peut être ajusté avec la moyenne du taux de changement de la force appliquée par l'opérateur. Tsumugiwa propose que le taux de changement de l'amortissement devrait suivre l'équation (2.4) :

$$\frac{\delta \mathbf{C}(k)}{\delta T_e} = \frac{\mathbf{C}_{max} - \mathbf{C}_{min}}{|\mathbf{h}_a \max|} |\mathbf{h}_a(k) - \mathbf{h}_a(k-1)| \quad (2.4)$$

6. Selon la description dans cet article, il serait davantage question d'un modèle d'admittance variable.

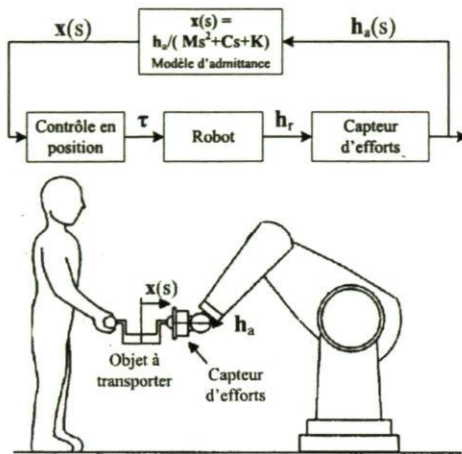


Figure 2.21: Commande en admittance pour des robots coopératif [27]

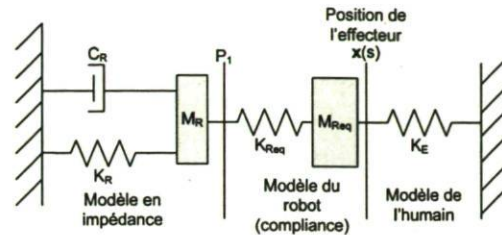


Figure 2.22: Modèle dynamique du système coopératif [28]

$$C(k+1) = \left(\frac{\delta C(k)}{\delta T_e} \right) \left(\frac{t-k}{T_e} \right) + C(k). \quad (2.5)$$

Cette équation donne la nouvelle valeur de l'amortissement pour chaque période d'échantillonnage T_e . Dans cette application, le manipulateur est asservi en utilisant une méthode à compliance virtuelle basée sur l'asservissement de la vitesse [104]. La raideur K est utilisée pour générer des forces virtuelles. Dans les applications de positionnement précis, ce terme devient très important. D'ailleurs, la commande en admittance peut devenir instable si l'utilisateur augmente la raideur de ses muscles pour effectuer un positionnement précis. Pour stabiliser le système, une augmentation de l'amortissement ou de la raideur est nécessaire [100]. Une analyse de la stabilité devient donc importante pour fixer les paramètres de ce type d'asservissement. D'abord, un modèle dynamique du robot doit être établi comme le montre la figure 2.22. Il faut aussi considérer le délai provenant de l'asservissement du mécanisme robotisé et le délai de réaction de l'utilisateur [28]. L'analyse du système en boucle fermée (figure 2.21) peut être réalisée avec les lieux des racines pour différents gains sur les paramètres à évaluer.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a introduit et présenté les questions fondamentales et les recherches antérieures sur la locomotion dans un monde virtuel et les interfaces haptiques. Les termes importants comme la démarche naturelle et la locomotion virtuelle sont abordés pour faciliter la compréhension de l'utilité d'une interface de locomotion. Une revue détaillée sur les interfaces de locomotion est également incluse. Un des problèmes majeurs rencontré lors de l'interaction entre l'humain et une interface haptique est la stabilité de l'asservissement. Ce problème, qui devient en soi un problème de sécurité d'interaction, doit être résolu spécifiquement en fonction de l'architecture du servocontrôleur qui sera choisie dans le prochain chapitre.

Suite à cette étude, il est possible de conclure que seulement quelques interfaces de locomotion peuvent permettre une démarche naturelle. La locomotion par la marche est intuitive et est un moyen de déplacement incontournable dans l'étude du comportement humain dans les environnements virtuels. Dans le domaine de la réalité virtuelle, une interface de marche doit permettre une démarche naturelle sans besoin d'apprentissage de la part de l'utilisateur. De plus, un servocontrôleur doit éviter ou au moins compenser les pertes d'équilibre du marcheur de façon sécuritaire. En effet, dans les systèmes de locomotion présentés dans ce chapitre, l'usager doit se déplacer avec prudence et, dans certains cas, il doit apprendre à marcher sur la plate-forme afin d'éviter d'en dépasser les capacités mécaniques, ce qui contraint la démarche et l'analyse de celle-ci dans un contexte de réadaptation.

D'ailleurs, le mécanisme omnidirectionnel agencé avec un simulateur de sol à topologie variable (*Ground Surface Simulator ou GSS*) de la section 2.2.3 n'est pas encore au point. Certains systèmes offrent cependant cette option comme l'ATLAS, mais ce système est très limité mécaniquement. Selon les applications, des choix de conception sont réalisés par les groupes de recherche. Ces choix limitent les applications des interfaces de locomotion développées dans d'autres domaines. L'idée développée avec le *StringWalker* a été retenue dans ces travaux considérant les avantages du mécanisme entraîné avec des câbles. Cette idée sera améliorée et permettra d'interagir avec tous les types d'objets virtuels. Il serait aussi possible d'ajouter un harnais similaire à celui développé par Ottaviano [25] pour maintenir l'équilibre de l'usager, pour assurer sa sécurité et pour simuler différentes contraintes tout en aidant l'algorithme de rappel.

Le prochain chapitre propose une méthode de conception d'une interface de locomotion haptique basée sur un cahier des charges précis. Par la suite, les spécifications matérielles et logicielles sont énumérées pour développer les architectures mécanique et logicielle de l'interface de locomotion développée au sein du laboratoire de robotique de l'Université Laval. Cette architecture permettra de résoudre certains problèmes rencontrés jusqu'ici par les autres interfaces de locomotion décrites dans ce chapitre. Cependant, les choix de conception pour la réalisation d'un système réel ajoutent des contraintes qui limiteront les quelques fonctionnalités.

Chapitre 3

Architecture de l'interface de locomotion

Ce chapitre traite des modèles qui sont utilisés lors de la conception de l'architecture du servocontrôleur de l'interface de locomotion basée sur un mécanisme entraîné avec des câbles proposés dans cette thèse. Il est question de la définition de la problématique ainsi que des spécifications matérielles et logicielles pour la conception réelle d'un premier prototype. Aussi, un aperçu des options sur l'asservissement du mécanisme est brièvement expliqué selon les applications en réadaptation. Finalement, l'architecture finale est proposée pour le développement d'une interface miniature fonctionnelle.

3.1 Introduction

La revue de la littérature du chapitre précédent a présenté les diverses interfaces de locomotion et leurs applications associées. D'une part, cette revue a permis de découvrir plusieurs possibilités pour la conception et la fabrication d'une interface de locomotion. D'autre part, ce chapitre constitue une source d'information utile lors de la détermination d'un mécanisme original respectant les contraintes et les spécifications fonctionnelles d'une marche naturelle dans un environnement virtuel.

Le présent chapitre traite de la modélisation des architectures mécaniques et de l'asservissement logiciel qui fournissent des capacités améliorées par rapport à celles présentées dans la revue de la littérature du chapitre 2. En particulier, il sera question d'élaborer un mécanisme qui permet non seulement une marche naturelle dans un environnement virtuel, mais qui facilite aussi la simulation d'un plancher à géométrie variable tout en étant omnidirectionnel. Ce chapitre présente une nouvelle méthode de conception d'une interface de locomotion avec un mécanisme entraîné par des câbles. Cette nouvelle approche innovatrice pourrait être très efficace dans plusieurs applications dont la réhabilitation. À cet égard, une étude détaillée de la technologie est réalisée pour assurer l'atteinte des performances optimales.

La première partie du chapitre est consacrée à la définition de la problématique à résoudre pour la réalisation d'une interface de marche basée sur deux mécanismes entraînés par des câbles. À partir de cette définition, l'approche retenue est présentée avec une revue de littérature et une analyse théorique de son principe de fonctionnement. Par la suite, une courte présentation de l'état actuel du projet est présentée pour finalement présenter une architecture du système complet basé sur le cahier des charges.

3.2 Problématique

La problématique à résoudre pour ces travaux de recherche est présentée en trois parties. La première partie explique un contexte d'application et d'utilisation particulier de l'interface de locomotion haptique. Ensuite, une modélisation de la démarche hu-

maine est présentée pour évaluer les spécifications minimales à atteindre par le système mécanique et par le servocontrôleur. Finalement, l'élaboration d'un cahier des charges exhaustif permet de diriger la conception d'une architecture globale qui sera présentée à la section 3.5. Cette architecture servira de référence tout au long des travaux.

3.2.1 Diagramme physique

La figure 3.1 présente la configuration matérielle de l'IL. Cette configuration est dérivée des approches développées dans la littérature, des objectifs, des contraintes définis dans le chapitre 1 et des travaux effectués jusqu'à ce jour dans le laboratoire de robotique de l'Université Laval. D'ailleurs, les intervenants dans le projet NELI sont présentés à la figure 3.2. Cette figure montre l'ampleur de l'intégration de ce système suite aux développements, aux travaux de recherche et aux résultats obtenus préalablement par les étudiants et les ingénieurs de recherche du Laboratoire de robotique de l'Université Laval, du Laboratoire de vision et des systèmes numériques et par le Laboratoire d'immersion virtuelle au centre de Recherche et développement pour la défense Canada - Valcartier. La configuration matérielle a été développée de manière à atteindre les objectifs d'une simulation réaliste de la marche dans un environnement virtuel.

En plus du travail d'intégration complet de l'interface de locomotion en version miniature, le rendu haptique et le rendu de la locomotion sont les sorties du système (voir la figure 1.4) qui seront davantage étudiés par ces travaux de recherche. Le rendu visuel est applicatif seulement et il n'y a pas de travaux de recherche qui ont été poursuivis dans ce domaine dans le cadre de la thèse. Ce servocontrôleur complexe comprend plusieurs algorithmes dont un algorithme d'estimation du temps d'arrivée d'une interférence (ETAI) et sur l'espace de travail, la commande optimale articulaire, la commande optimale hybride cartésienne en impédance et en admittance, la modélisation de la physique de l'environnement virtuel et une étude de la gestion du harnais et du rappel. Les contributions scientifiques attendues sont les suivantes :

- intégration d'une interface de locomotion haptique miniature fonctionnelle basée sur un mécanisme entraîné par 18 câbles (dont deux câbles pour le harnais passif et huit câbles pour chacune des deux plates-formes) ;

- développement d’une servocommande articulaire et cartésienne adaptée au projet ;
- modélisation des critères de conception d’un enrouleur performant pour effectuer un rendu d’impédance ;
- développement des critères de performances pour l’asservissement d’un câble en tension ;
- conception d’un moteur physique qui assure une commande hybride (en impédance et en admittance) stable et cohérent avec la physique de l’environnement virtuel ;
- gestion des interférences entre les câbles de deux plates-formes qui ont chacune six DDL et
- validation avec l’aide d’un robot marcheur humanoïde (Kondo KHR-1HV) télécommandé de 19 DDL.

La modélisation d’un algorithme de rappel adaptatif à quatre DDL sera présentée mais ne constitue pas une contribution de cette thèse. Ce rappel nécessitera une étude plus approfondie pour permettre une commande hybride cartésienne sur les plates-formes. Ce rappel devra donc être intrinsèque au moteur physique non seulement pour adéquatement rendre le monde haptique avec un modèle de friction mais aussi pour aider la simulation des accélérations et des décélérations.

En ce qui concerne l’intégration finale, elle consiste à fabriquer les enrouleurs (figure 3.3), de les caractériser avec une analyse du comportement réel d’un câble, de monter les enrouleurs sur une structure portante, de calibrer la position des 16 enrouleurs, de monter un harnais de un DDL et finalement de monter le robot marcheur de manière à obtenir le résultat final présenté à la figure 3.4. Un des plus gros défis d’intégration est de relier le monde virtuel (moteur physique, rendu visuel, interface utilisateur) jusqu’au servocontrôleur articulaire de chaque enrouleur.

3.2.2 Contexte d’application

Le projet *NELI* (*Network Enable Locomotion interface*) est réalisé pour permettre à plusieurs usagers d’interagir dans un environnement virtuel partagé par l’intermédiaire d’un réseau Ethernet [3, 35]. Compte tenu de l’étude réalisée sur les applications des

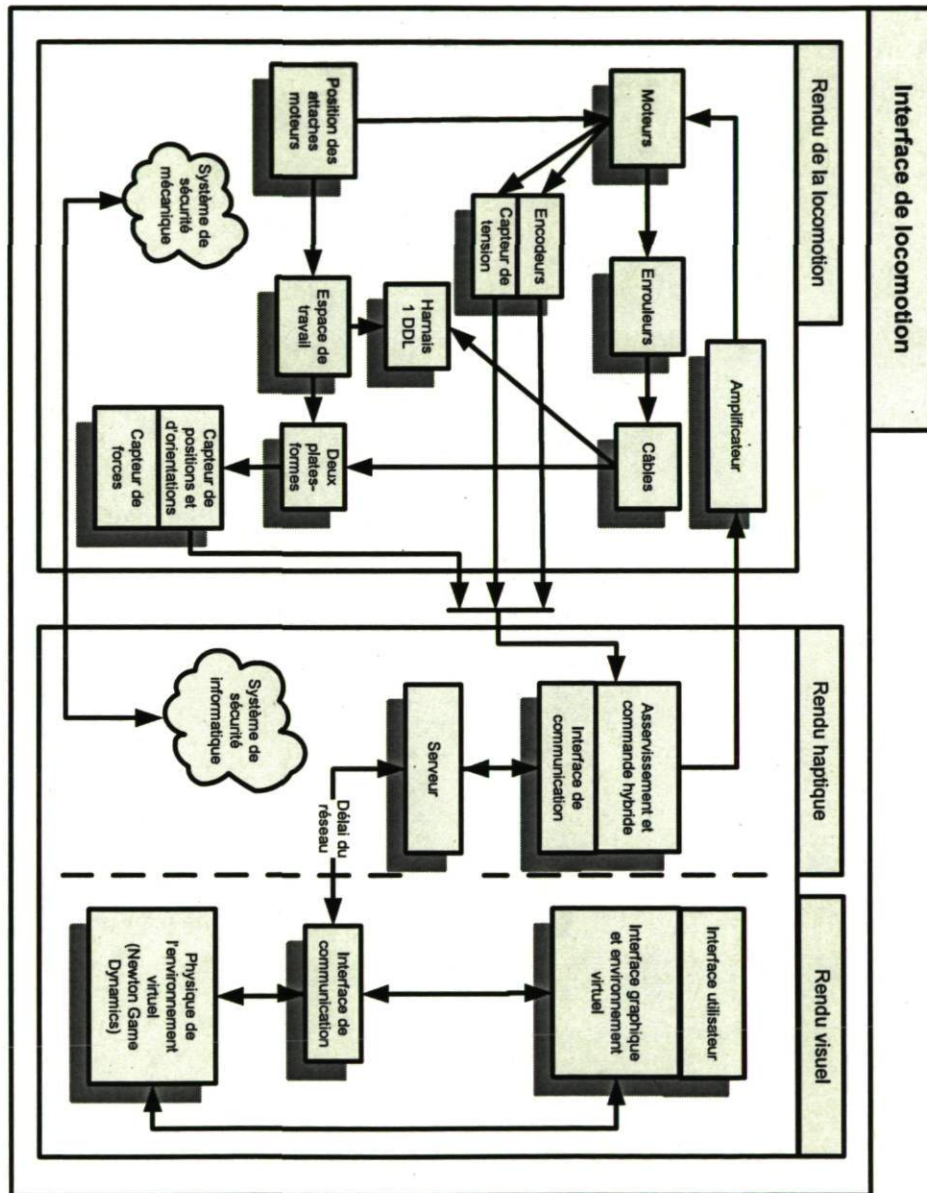


Figure 3.1: Configurations matérielle et logicielle de l'IL

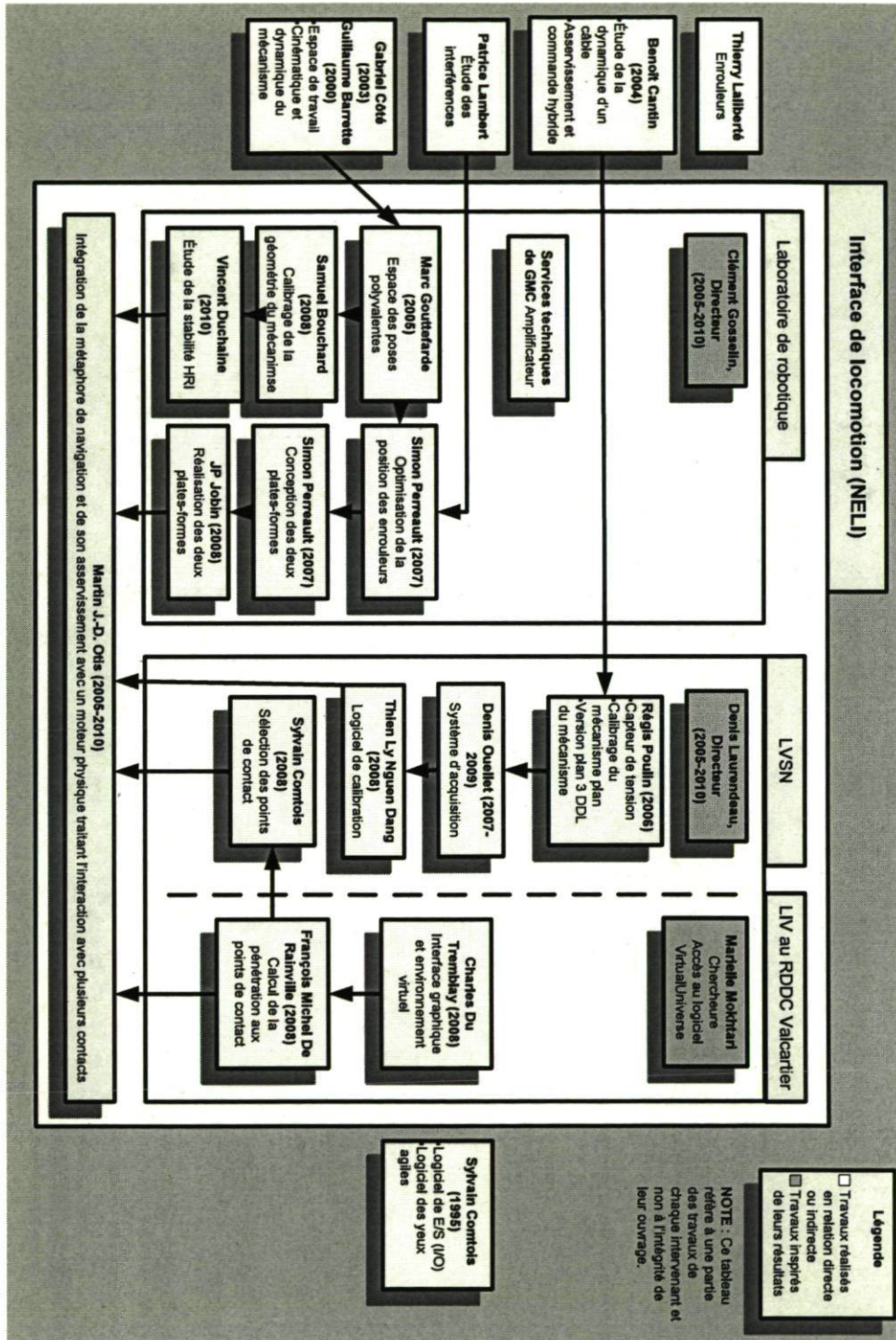


Figure 3.2: Intervenants dans le projet NELI



Figure 3.3: Fabrication des enrouleurs avec l'amplificateur 4-20 mA



Figure 3.4: Interface de locomotion finale avec le robot marcheur et S. Perreault

interfaces de locomotion, il serait possible de définir une nouvelle application qui n'a pas encore été étudiée jusqu'à présent dans la littérature. Cette section présente donc des idées possibles d'applications dans le domaine de la réhabilitation et de la réalité virtuelle.

Une application dérivée de celle proposée par Schmidt [12] pourrait être intéressante, soit la reconnaissance de pathologies à partir des trajectoires des pieds, des genoux et des hanches. D'ailleurs, la reconnaissance automatique de la démarche pourrait être implantée comme le suggère Begg [105]. Un algorithme dit intelligent pourrait se servir d'une base de connaissances expertes adaptatives similaires aux systèmes utilisés à la reconnaissance des formes en vision. Dans l'identification de pathologies, Holzreiter a développé, à l'aide des réseaux neurones, un algorithme qui permet de différencier les démarches pathologiques des démarches normales [106]. Ce réseau de neurones est entraîné à partir de différentes démarches préalablement diagnostiquées sans l'utilisation d'un modèle mathématique de la biomécanique de la démarche.

Suite à l'identification de la pathologie et des caractéristiques physiques du patient, il serait possible que l'interface elle-même propose des exercices avec des trajectoires prédéfinies, calculées avec les coefficients de Fourier (équation 2.1) comme le montre la figure 2.5 dans le chapitre 2. Avec l'IL proposée dans cet ouvrage, un patient peut s'entraîner à la marche naturelle avec différentes trajectoires et différentes vitesses pour les pieds. Après un certain temps d'apprentissage, le patient peut s'exercer à marcher librement, sans trajectoire imposée. Le thérapeute peut diminuer ou augmenter gra-

duellement le support à cette trajectoire selon le succès du patient à suivre celle-ci correctement. Il serait aussi possible d'imposer certains mouvements au niveau du bassin par l'ajout d'un harnais robotisé.

D'autres études proposent des programmes d'exercices préventifs pour les personnes âgées [107]. Ces programmes ont été élaborés pour prévenir les chutes. D'ailleurs, certaines études démontrent qu'il y a des changements significatifs entre la démarche d'une personne normale et celle d'une personne à risque. Une analyse de la position des pieds et de la longueur des pas est suffisante pour déterminer si une personne est plus à risque qu'une autre de chuter en marchant [108].

Les avantages potentiels d'une interface de locomotion robotisée incluent la sécurité, la répétabilité et une durée d'entraînement illimitée. De plus, dans un milieu clinique, l'interface de locomotion libère le thérapeute. D'un autre côté, Schmidt propose, sur son interface *Haptic Walker*, un nombre de mesures de sécurité actives et passives pour assurer un fonctionnement adéquat dans une application en réhabilitation. Ces mesures portent sur la conception tant mécanique, électrique que logicielle. En effet, il propose des circuits électriques et des algorithmes logiciels (routines) redondants et indépendants [74].

3.2.3 Modélisation de la démarche humaine

Une interface de locomotion haptique doit répondre aux critères de la biomécanique humaine. Cette section présente l'essentiel de la composition d'une démarche normale. Premièrement, la spécification d'un repère absolu du monde réel est essentielle pour définir les équations de la cinématique et de la dynamique. La figure 3.5 montre le système de coordonnées utilisé [29]. La direction verticale positive est définie vers le haut par l'axe Z . La direction de progression (antérieure-postérieure) est positive vers l'avant selon l'axe X . La direction de côté (médiale-latérale) est positive vers la gauche suivant l'axe Y .

Les positions relatives de deux centres de gravité principaux sur le long du tronc sont représentées sur la figure 3.6. Ces positions influencent directement les stabilités d'un marcheur. Ainsi, pour maintenir l'équilibre, le déplacement d'un segment de

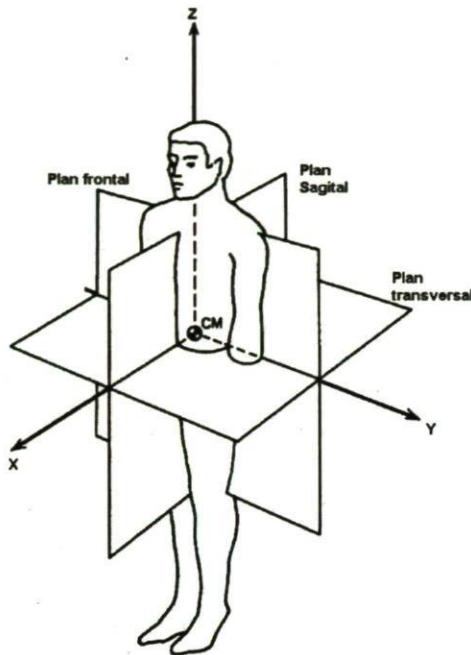


Figure 3.5: Système de coordonnées spatiales (version modifiée de [29])

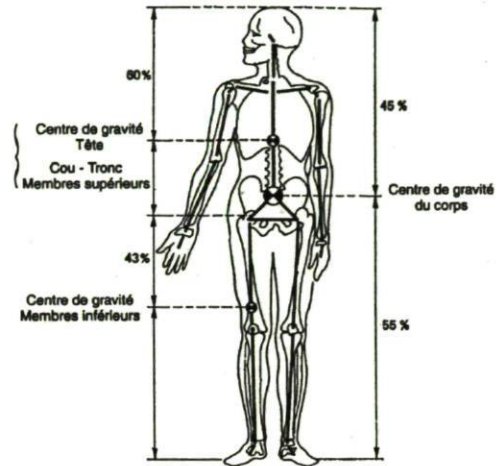


Figure 3.6: Les centres de gravité du corps humain [30]

membre est accompagné par un déplacement d'un autre segment en direction opposée. Ce changement de géométrie régule la position du centre de gravité par rapport au sol. Donc, un mouvement volontaire est précédé et accompagné de modifications de la posture qui minimisent et anticipent les conséquences sur l'équilibre [2].

3.2.3.1 Le cycle de la marche

Le cycle de la marche est globalement composé en deux périodes : la phase d'appui ou portante (*stance phase*) et la phase d'oscillation (*swing phase*) comme le montre la figure 3.7. Par convention, la marche est décrite par rapport au membre inférieur droit. Pendant la phase d'appui (phase sustentatrice et équilibratrice), les muscles équilibrateurs sont sollicités alors que, pendant la phase d'oscillation, le membre inférieur avance pour atteindre le sol en avant du marcheur.

La phase d'appui a une durée de 60 % du cycle. Elle se divise en trois parties dont les deux doubles contacts (DC) en début et à la fin et le simple contact (SC). Le rapport entre ces trois périodes peut être perturbé par plusieurs pathologies. La

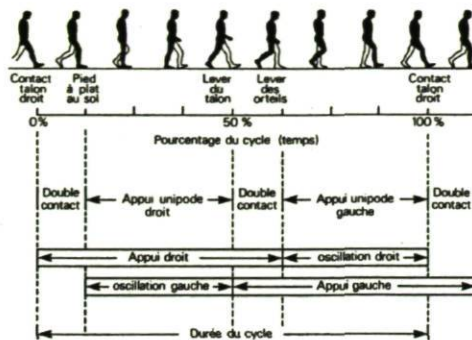


Figure 3.7: Les divisions du cycle de marche [30]

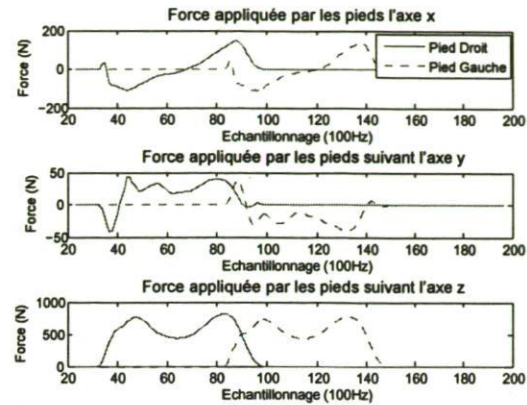


Figure 3.8: Les forces appliquées au plancher par les pieds [31]

période des doubles contacts est considérée instable et conduit à une restauration entre deux équilibres sur un pied unique. La figure 3.9 montre les quatre roulements observables lors du déroulement du pas pendant la phase d'appui. Lorsque le talon touche le sol (A), le pied est généralement en rotation externe alors qu'au moment où les orteils quittent le sol (D), le pied est en rotation interne. Cette rotation n'est pas nécessairement symétrique. En (B), le pilon tibial glisse et roule sur le dôme de l'astragale. Finalement, en (C), le pied roule autour de la métatarso-phalangienne [30]. Les adducteurs de hanche aident à la flexion de hanche et asservissent la stabilité du membre inférieur en rotation (voir figure 3.10). D'un autre côté, la phase oscillante ne requiert aucune commande musculaire et une faible vigilance permet d'éviter des obstacles. Le membre inférieur est libre et se comporte comme un double pendule [2].

3.2.3.2 Paramètres biomécaniques

Lors de la conception de l'algorithme de rappel (la méthode qui simule un environnement infini dans un espace physique restreint) de l'interface de locomotion, il est nécessaire de connaître certains paramètres de la marche dont le temps de l'action, la vitesse de déplacement et l'espace de travail. Pour effectuer les mesures quantitatives sur la marche, l'espace de travail pour la prise des mesures d'un cycle de marche est divisé en trois sections : la piste d'élan de six mètres pour adopter une vitesse de marche confortable, la piste de marche de 10 mètres sur laquelle les mesures sont effectuées et la piste de décélération de six mètres. Le temps des différentes phases dans la démarche sont décrits dans le tableau 3.1 alors que les vitesses le sont dans le tableau 3.2. Les

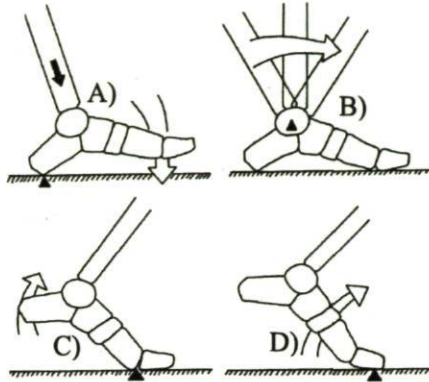


Figure 3.9: Mouvement du pied dans la phase d'appui [30]

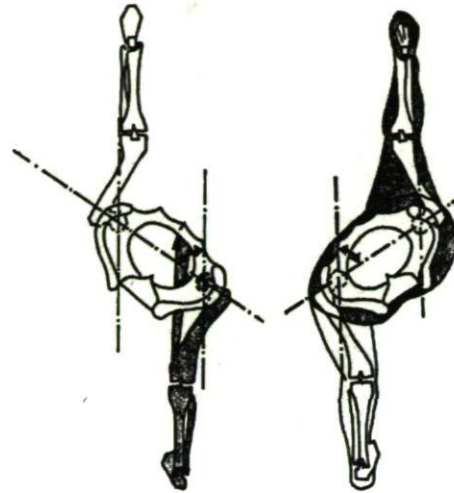


Figure 3.10: Rotation du bassin dans le plan transversal [30]

temps ont été évalués pour trois marcheurs normaux de sexe masculin. Ils dépendent de nombreux facteurs dont l'âge, le sexe, la physiologie et le type de marche (lente, modérée, déterminée, rapide, etc.) [2]. De ces paramètres, il est possible d'établir l'équation 3.1 qui représente le déplacement en mètre, où v_m est la vitesse maximale, k_v est une constante d'accélération, $x(t)$ est le déplacement total vers l'avant et t le temps [49] :

$$x(t) = v_m \left(t + \frac{(e^{(-k_v t)} - 1)}{k_v} \right). \quad (3.1)$$

Aussi, pour effectuer les choix de conception mécanique (sur les câbles, les moteurs et la structure) de l'interface de locomotion, il est important de vérifier les forces impliquées lors de la marche. La figure 3.8 montre les forces que les pieds appliquent au plancher [31]. Évidemment, la géométrie des plates-formes de même que la position des enrouleurs modifient les valeurs des tensions dans les câbles. À ce sujet, Simon Perreault a conçu les plates-formes pour assurer un espace de travail optimum dans l'IL [109]. Cette géométrie est présentée à la section 3.4.

Tableau 3.1: Temps de contact au sol [2]

Phases	Temps absolu (sec.)
Cycle de marche	0,98
Phase d'oscillation	0,36
Phase d'appui	0,62
Contact talon/sol	0,02
Contact pulpe du gros orteil/sol	0,30

Tableau 3.2: Vitesses moyennes

Groupe d'âge	Allure	Vitesse moyenne ^a
Jeune [110]	Modérée	$0,77 + 0,031d$
	Rapide	$1,09 + 0,087d$
Adulte [111]	Modérée	$1,17 - 0,04(d - 70)$
	Rapide	$1,84 - 0,06(d - 70)$

a. v : vitesse en km/h, d : âge

3.2.3.3 Modélisation de la démarche

Éventuellement, il serait intéressant d'intégrer un modèle de la démarche pour étudier certaines pathologies. Plusieurs études ont été réalisées à ce sujet. Winter présente toutes les équations pour simuler correctement une marche avec un modèle dit de segments-liés (*link-segment model*). Chaque segment possède une masse et une inertie agissant en son milieu. Deux méthodes de l'analyse du mouvement sont possibles : la dynamique inverse qui analyse les forces qui causent le mouvement et la solution directe (*forward solution*) qui analyse le mouvement des segments du modèle [29]. L'approche directe est souvent utilisée pour l'analyse du mouvement en robotique ou lorsqu'une interface de marche avec son servocontrôleur est investiguée. Plusieurs modèles plans de la démarche sont présentés dans la littérature dont celui de Pandy [112]. Cependant dans le cas d'une interface de locomotion, il serait préférable d'utiliser un modèle anthropomorphique en 3D qui simule mieux une démarche normale. Wojtyra propose un tel modèle avec 21 degrés de liberté comme le montre la figure 3.11. Les effets de friction et d'impact sont considérés dans la modélisation des forces de réaction du sol. D'ailleurs, la pression et la forme du contact entre le pied et le sol sont modélisées pour reproduire la réalité [32]. Le modèle présenté a été amélioré par la suite avec l'ajout de deux DDL et la simulation de l'action de 54 muscles lors de la marche. Dans ce modèle,



Figure 3.11: Modèle anthropomorphique en 3D du squelette [32]

la marche est simulée, entre autres, par le calcul de l'énergie métabolique minimale par unité de distance parcourue [113].

3.2.4 Cahier des charges

L'objectif de cette section est de déterminer les contraintes physiques et mécaniques ainsi que d'élaborer les spécifications fonctionnelles que doit satisfaire une interface de locomotion haptique. En prenant en considération les avancées récentes, l'interface proposée est conçue pour offrir les fonctionnalités suivantes :

- conserver le corps du marcheur au centre de l'interface de locomotion : les actions locomotives commandant la navigation sont lancées et soutenues par la partie inférieure du corps. Cette approche préservera les réflexes normaux de l'utilisateur ;
- favoriser un déplacement omnidirectionnel : le déplacement est possible dans n'importe quelle direction ;
- permettre un mouvement libre et peu limité : pour un grand degré de réalisme les mouvements communs et usuels ne doivent pas être limités ;
- simplicité d'utilisation : l'interface de locomotion est simple d'utilisation, simple d'apprentissage, facile à installer et demande peu d'entretien.

Tableau 3.3: Types de mouvement permis [3]

Types de mouvement	Explications
Marcher vers l'avant ou l'arrière	Marcher vers l'avant ou vers l'arrière avec un arrêt brusque
Marcher de côté	Se déplacer de côté sans croiser les jambes
Tourner	Marcher vers l'avant et tourner par de petits angles (20-30 degrés autour du lacet) sans croisement des jambes ; à l'arrêt, se tourner sans croisement des jambes
Monter et descendre	Monter et descendre des escaliers ou une pente
Interactions physiques	Déplacer des objets virtuels

Aussi, l'interface de locomotion permettra des accélérations et des décélérations entre les différentes démarches comme la course, la marche jusqu'à l'immobilisation complète. Ce sont des caractéristiques qui concernent la manoeuvrabilité et la navigation. Une description des tâches de la locomotion que doit offrir l'interface peut être résumée en quatre points [17] :

- vitesses relatives : immobilisation, marche, course ;
- transition entre les différentes démarches : accélération et décélération ;
- direction du mouvement variable : avancer ou reculer, monter ou descendre, effectuer des pas de côté ;
- changement de direction possible : en ligne droite ou en rotation.

En effet, certains mouvements devront être gérés adéquatement par le servocontrôleur comme tourner sur place, effectuer des pas latéraux et incliner la partie supérieure du corps sans le mouvement des pieds. Le tableau 3.3 présente ces différents mouvements permis dans l'interface de locomotion [3].

Tableau 3.4: Paramètres approximatifs pour les informations sensorielles [4]

Sens	Paramètre	Unité
Vision	60	Hz
Ouïe (délai ou phase)	50	msec.
Mouvement de la peau	30	Hz
Vibration et texture	50-320	Hz
Proprioception et kinesthésique	20-30	Hz

3.3 Spécifications matérielles et logicielles

Les spécifications matérielles et logicielles définissent les caractéristiques approximatives pour favoriser une immersion complète de l'utilisateur dans un environnement virtuel. Ces caractéristiques sont très connues dans le domaine de l'instrumentation en appareillage médical pour la conception, entre autres, des électroencéphalogrammes, des défibrillateurs et des prothèses cochléaires. Plusieurs recherches sont réalisées dans ce domaine dont [114], [115] et [116]. En ce qui concerne les temps de rafraîchissement des différentes interfaces haptiques qui doivent être utilisés lors de la conception d'une interface de locomotion, le tableau 3.4 résume les fréquences d'échantillonnage¹ et les paramètres approximatifs à utiliser pour la majorité des sens [4]. Ces paramètres sont subjectifs et dépendent de l'accomodation et des réflexes de chaque personne.

En premier lieu, la performance de la rétine dans l'oeil humain, qui possède environ 100 millions de photorécepteurs, est étonnante. En effet, la vision photopique, générée par les cônes, qui possède une plus faible sensibilité que les bâtonnets mais qui permet une vision diurne, peut être stimulée jusqu'à une fréquence de 90 Hz. D'un autre côté, la vision scotopique (ou nocturne générée par les bâtonnets), fonctionne à de plus faibles fréquences de stimulation, soit à un maximum d'environ 18 Hz. Ces valeurs sont obtenues avec l'aide d'une électrorétinographe (ERG) [117]. Elles correspondent à des valeurs maximales, c'est-à-dire qu'elles varient en fonction de la couleur, du contraste, de la luminosité, de la périodicité, de l'âge, de la position et de la vitesse de déplacement de la source. Aussi, les réponses corticales et psychophysiques sont habituellement plus faibles [118].

1. L'humain n'a pas une seule largeur de bande et les réponses aux différents stimuli dépendent de certaines situations dont la génération des réflexes, l'apprentissage, la motivation et la périodicité des signaux.

En ce qui concerne le simulateur, le problème se situe davantage au niveau de la latence du traitement de l'information que sur l'affichage dans le cas où les problèmes de battement avec la lumière ambiante, d'interférences, de gigue² et de vague sont exclus et si les maladies oculaires comme l'exophtalmie sont aussi exclus. En effet, le système d'exploitation généralement utilisé n'a pas de noyau temps-réel pour le rendu visuel. Il est donc possible d'obtenir un traitement retardé sur la fréquence prescrite occasionnant un scintillement. Une fréquence élevée peut donc garantir une réponse supérieure à 30 Hz. Dans le cas d'une télévision, le temps de rafraîchissement est garanti. Par exemple, le PAL et le SECAM possèdent une cadence fixe à 25 images par seconde alors que le NTSC possède une cadence de 30 images par seconde. En ce qui concerne les problèmes de battement, le résultat perçu provient de la différence des fréquences et d'amplitude entre la lumière ambiante et le taux de rafraîchissement de l'écran. Ce problème peut se rencontrer avec les écrans CRT et les projecteurs analogiques.

Le problème de rafraîchissement visuel se produit pour des mouvements rapides de l'utilisateur lors de l'exploration de l'environnement virtuel. Entre autres, Garrett [116] propose une méthode d'estimation par réseau de neurones pour prévoir le mouvement de la tête et ainsi diminuer le temps de réponse entre l'acquisition de la position de la tête et le rendu visuel. L'œil perçoit des scintillements (papillotements)³ pour une fréquence inférieure à 30 Hz lorsque l'image projetée est fixe (sans mouvement), ce qui peut provoquer une fatigue oculaire importante. Une fréquence de 60 Hz sur le rendu visuel permet d'obtenir un flux d'images plus confortable à regarder avec un HDM binoculaire. Cependant, selon la littérature, la plupart des lunettes 3D vont produire des scintillements à cette fréquence.

En deuxième lieu, pour l'ouïe, c'est la latence qui est importante lorsque le son est ambiphonie 3D. La plupart des systèmes ont un délai de moins de 50 msec. C'est un délai confortable pour ne pas avoir des vertiges en tournant la tête rapidement. Dans le cas de la bande passante, les cartes de son standard sont maintenant en mesure de reproduire les effets recherchés.

En troisième lieu, la largeur de bande idéale de l'haptique (tact et retour d'effort) est d'au moins 320 Hz si l'objectif est de pouvoir reproduire les vibrations et d'atteindre

2. La gigue est provoquée par des erreurs de transmission des données sur une ligne de transmission comme la dispersion temporelle et le glissement de phase (en anglais : *jitter*).

3. En anglais : *flicker*

des vitesses de déplacement élevées, mais cette performance est souvent difficile à réaliser. Dans le cas d'une interface haptique avec un retour d'effort, les deux largeurs de bande fréquentielle en position et en force définissent la fréquence de Shannon-Nyquist qui se situe généralement sous 30 Hz. Cette fréquence est limitée par le couplage entre la réponse de l'actionneur et la réponse de la structure mécanique de l'interface haptique. La phase introduite par le système d'acquisition doit donc être diminuée dans la bande passante, d'où l'intérêt de fixer une fréquence d'échantillonnage et d'actionnement beaucoup plus élevée que le double de la bande passante mécanique. Dans le cas de la reproduction des textures, des actionneurs spécialisés, comme des piézo-électriques de très faible dimension, permettent d'augmenter la largeur de bande. Pour une interface de locomotion haptique, l'objectif est de réaliser un système qui a une largeur de bande mécanique correspondant à celle de la proprioception et de la kinesthétique. Aussi, la physique de l'environnement virtuel couplée au délai de la communication avec le servocontrôleur doit au moins fournir un rafraîchissement des informations à cette fréquence. Cependant, la vitesse maximale de la plate-forme a aussi un enjeu sur le choix de cette fréquence. En effet, il existe une fonction proportionnelle entre la fréquence d'actionnement et d'échantillonnage f_e ⁴ et la vitesse maximale du mécanisme v_m . Cette fonction est représentée par la variation de position maximale δx qui n'est pas détectable, entre deux pas de temps de calcul (entre l'acquisition de la position et l'actionnement des enrouleurs) : $f_e = \frac{2v_m}{\delta x}$. Cette variation de position δx peut occasionner une pénétration dans un objet virtuel sans détection de contact entre cet objet et la plate-forme. Bien que des algorithmes existent pour estimer le temps et la position d'un contact dans les bibliothèques des moteurs physiques, il est nécessaire de fixer la fréquence d'échantillonnage en fonction de cette vitesse maximale. Finalement, pour éliminer les sensations de vibration causées par la latence du servocontrôleur, la fréquence d'acquisition et d'actionnement devrait être supérieure à 320 Hz. Avec cette fréquence, pour une marche normale lente dont la vitesse moyenne est de 1,5 km/h, la pénétration qui n'est pas détectable est de 2,3 mm alors que pour 20 km/h, l'erreur est de 3,4 cm. Un mauvais choix de cette fréquence réduit le domaine de stabilité de l'interface de locomotion [119].

4. Dans le cas particulier où le système d'acquisition, d'actionnement et d'asservissement n'est pas multi-cadence.

Tableau 3.5: Seuils de perception des accélérations [5]

Conditions	Avant-Arrière	Gauche-droit	Haut-bas
Attention portée sur les accélérations (m/s^2)	0,17	0,17	0,28
Attention portée sur une tâche (m/s^2)	0,51	0,51	0,84

3.3.1 Limites sécuritaires sur les accélérations

La sécurité des interfaces haptiques dédiées à la réhabilitation est essentielle et elle doit être incluse dans les objectifs de conception et dans le cahier des charges. La première section discute des limites de perception des accélérations maximales des canaux semi-circulaires. La deuxième section concerne les limites d'accélération que l'humain peut supporter sans perdre l'équilibre selon [6]. La dernière section concerne les limites physiques d'accélération que le corps peut supporter sans lésion.

3.3.1.1 Seuils de perception des accélérations

Selon Poulin [3], afin de déterminer les spécifications de dimensionnement de l'interface de locomotion, il est nécessaire d'avoir une idée des seuils de perception des accélérations. Ce dimensionnement est nécessaire pour concevoir la stratégie de rappel afin de simuler des déplacements dans un environnement virtuel aux dimensions infinies. Ce rappel consiste à appliquer une force ramenant l'utilisateur vers le centre de l'espace de travail. La force maximale qu'on peut appliquer à l'utilisateur a un impact direct sur la détermination des dimensions du système. Cette force maximale ne doit pas être trop grande car l'utilisateur ne doit pas la ressentir. Par contre, elle ne doit pas être trop petite pour éviter un espace de travail trop volumineux. À ce sujet, le tableau 3.5 présente les seuils de perception des accélérations selon Reid et Nahon [5] dans le cas d'un simulateur de vol (l'utilisateur est assis).

Tableau 3.6: Seuils des accélérations sur l'asservissement de l'équilibre [6]

Références	Accélérations limites (m/s^2)			Informations additionnelles
	<i>Vers l'avant</i>	<i>Vers l'arrière</i>	<i>De côté</i>	
De Graaf	0,61	0,54	0,43	Estimée utilisant un mouvement (accélération constante et instantanée) du sol dans la direction opposée.
Jonkees	0,76	0,48	0,33	Les pieds joints.
Standard européen du trafic routier	0,15		0,5	Accélération tolérable avec une main courante.

3.3.1.2 Seuils des accélérations sur l'asservissement de l'équilibre

Une personne a une tolérance différente à une accélération selon la direction dans laquelle la force est appliquée par rapport à la position des pieds. Une personne poussée vers l'arrière (pivotant sur leurs talons) s'équilibre plus difficilement qu'une personne poussée vers l'avant (pivotant sur leurs orteils). Une accélération latérale est la moins facile à stabiliser. De même, l'effet de stabilisation est différent selon la position des deux pieds par rapport au centre de masse d'une personne. Le tableau 3.6 donne les valeurs limites de l'accélération avant un déséquilibre postural.

3.3.1.3 Seuils des accélérations sans lésion [1]

Plusieurs facteurs influencent les seuils d'accélération sans lésion. Les facteurs sont l'intensité, la durée, le taux de croissance ou de décroissance, la surface d'application de la force sur le corps et la direction de la force (axes G_X , G_Y ou G_Z , voir figure 3.12).

Les effets physiologiques observables des accélérations sont le résultat des forces centrifuges et l'augmentation du poids du corps. Les accélérations de faible amplitude, nommées G_s , sont de l'ordre de 1 à 10G appliquées sur une période de temps n'excédant pas plus de quelques secondes (entre 0,1 et 3 secondes pour une accélération de durée intermédiaire). Pendant les exercices de vol, les principaux systèmes touchés dans le corps humain sont le système cardio-vasculaire et respiratoire.

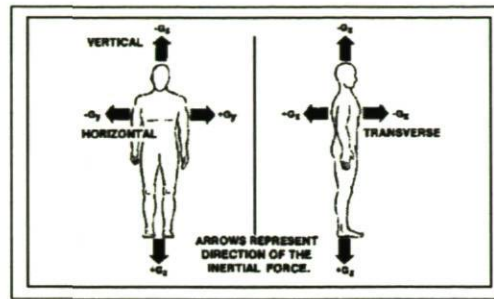
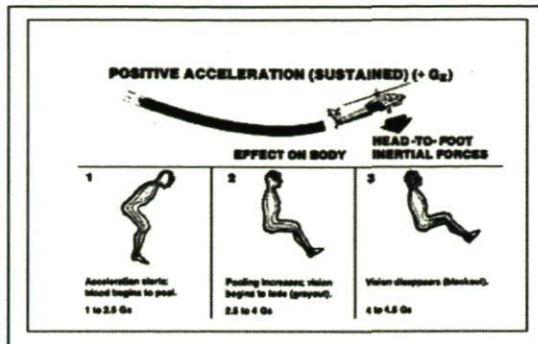
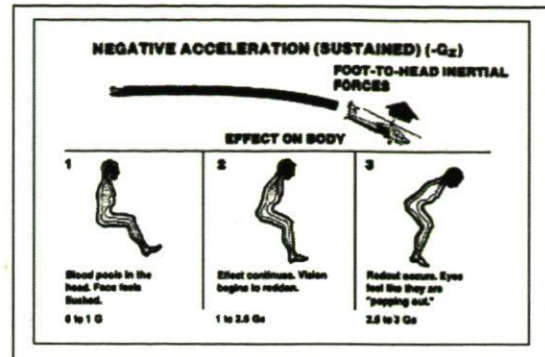


Figure 3.12: Définition des directions des accélérations [1]

Quand une force de $5 + G_z$ est appliquée sur le corps, une pression du sang de 120mm/Hg se produit dans les organes inférieurs du corps. Puisque cette pression est égale à la pression sanguine normale artérielle systolique, il y a un équilibre qui empêche le sang de circuler vers le cerveau. Donc, une accélération de $5 + G_z$ appliquée sur le corps humain peut entraîner l'inconscience à court terme et la mort à long terme. La figure 3.13 montre les conditions d'applications des forces centrifuges entre 1 et $5 + G_z$. À environ $4 + G_z$, la vision est complètement perdue (apparition du voile noir puisque la pression des artères rétiniennes et des sommets pulmonaires tombe à 0mm/Hg) juste avant la perte de conscience lorsque l'accélération augmente jusqu'à $5,5 + G_z$. La saturation de l'oxygène du sang peut tomber (de la normale à 98%) à 85% pendant une exposition de $7 + G_z$ pendant 45 secondes. La modification de la pression artérielle n'est pas immédiate et prend entre 6 et 12 secondes pour qu'elle s'établisse.

Une accélération négative $-G_z$ (figure 3.14) entraîne une élévation pointue des pressions artérielles et veineuses au niveau cérébral. La pression accrue dans les veines en dehors de la cavité crânienne peut être suffisante pour rompre les veinules à parois minces (petites veines). Il y a peu de danger réel d'hémorragie intracrânienne ou de dommages vasculaires cérébraux aussi longtemps que le crâne reste intact. Les hémorragies dans l'oeil sont la principale source de dommages causés par une accélération négative $-G_z$. Une accélération soudaine de $3 - G_z$ est la limite de la tolérance humaine. Quand une telle force est appliquée, une pression veineuse de 100mm/Hg est développée et cause de petits saignements cervicaux et des malaises.

La majorité des individus sont plus tolérants aux accélérations $+/- G_x$. Des valeurs extrêmes (12 à $15 +/- G_x$) appliquées pendant moins de cinq secondes peuvent déplacer les organes et même déplacer la position du coeur qui vient en interférence avec le système respiratoire. À plus de $7 + G_x$, la respiration devient plus difficile en raison

Figure 3.13: Force centrifuge $+G_z$ [1]Figure 3.14: Force centrifuge $-G_z$ [1]

de l'effet sur le mouvement de torse. Quelques individus, cependant, ont résisté à des niveaux de $20 + G_x$ pendant plusieurs secondes sans difficulté majeure. Le seuil de tolérance pratique est de $8 + / - G_x$ pendant moins de six minutes. En ce qui concerne les accélérations $+ / - G_y$, elles sont pratiquement inexistantes sur les avions actuels d'où le peu d'expérimentations dans la littérature.

3.4 La géométrie de l'interface de locomotion

Le système mécanique contient les actionneurs avec leurs enrouleurs, les câbles, les deux plates-formes pour les pieds contraintes dans les six DDL et la cage qui soutient les composantes. Chaque plate-forme peut être séparée en deux principales composantes : i) un châssis fixe qui inclut le point d'attache d'un câble où le câble est actionné par des enrouleurs motorisés, et ii) un châssis mobile, nommée la plate-forme sur laquelle le pied du marcheur est installé. Cette section explique les principes de conception du mécanisme selon la définition de la problématique de la section précédente. D'ailleurs, la plate-forme qui supporte le pied dans l'interface de locomotion doit assurer le mouvement du pied selon la figure 3.9. Ce mécanisme est nommé une interface de locomotion entraînée par des câbles (ILEC).

La figure 3.15 montre la géométrie choisie pour la conception du mécanisme. Le choix de huit enrouleurs par plate-forme repose sur plusieurs raisons. D'abord, pour qu'une pose d'un manipulateur soit polyvalente, le manipulateur doit être redondant et les enrouleurs doivent être disposés de façon efficace [120]. Gouttefarde donne une

définition de l'espace des poses polyvalentes (EPP) :

« Une pose polyvalente de l'effecteur d'un mécanisme parallèle entraîné par câbles est une pose dans laquelle n'importe quel torseur peut être généré à l'effecteur en tendant les câbles du mécanisme. L'EPP est l'ensemble de ces poses. » [120].

De plus, pour interagir avec l'environnement virtuel (déplacer des objets avec les pieds) et permettre la réhabilitation ou l'entraînement à la marche (en imposant une trajectoire), la plate-forme doit idéalement être asservie dans les six DDL afin de simuler adéquatement un rendu haptique [121]. Dû au principe de l'unatélarité d'actionnement, il est donc nécessaire d'avoir au moins sept câbles pour asservir les six DDL de la plate-forme. Finalement, un enrouleur supplémentaire a été ajouté à la géométrie pour augmenter l'espace de travail et pour réduire l'énergie que chaque moteur doit fournir pour équilibrer les efforts appliqués sur la plate-forme. Cet enrouleur supplémentaire permet d'imposer à l'algorithme d'optimisation des axes de symétrie entre l'ensemble des enrouleurs et ainsi de conserver un certain degré de simplicité de la conception. Perreault a travaillé sur l'étude de l'optimisation de cette géométrie à l'aide d'un algorithme génétique pour que la plate-forme puisse couvrir le plus grand espace de travail possible dans un volume limité (i.e. à l'intérieur des dimensions complètes de l'interface de locomotion) tout en limitant le nombre d'interférences entre les câbles, avec le mécanisme et avec l'utilisateur lors de la marche [33].

Les dimensions finales de l'espace de travail de la plate-forme (pour la version finale 1 : 1) suivant les axes X, Y et Z sont respectivement 2 mètres, 0,6 mètre et 1 mètre avec des rotations de $\phi = \pm 45$ degrés, $\theta = \pm 45$ degrés et $\psi = \pm 20$ degrés (angles d'Euler correspondant aux rotations ZYX respectivement). Ces dimensions sont à l'intérieur des dimensions complètes de l'interface de locomotion qui sont approximativement de 6,0 mètres par 3,5 mètres par 3,0 mètres. Ces dimensions assurent à l'utilisateur de pouvoir se déplacer en utilisant plusieurs démarches comme tourner et monter des escaliers librement et naturellement. Dans le cas du prototype réalisé dans cet ouvrage (échelle réduite 1 : 3), les dimensions ont été ajustées pour que la géométrie puisse être contenue dans un cube avec des arêtes de 2 mètres. Puisqu'il n'est pas possible de supporter le poids d'une personne sur ce prototype, un robot marcheur humanoïde est utilisé pour en valider le principe.

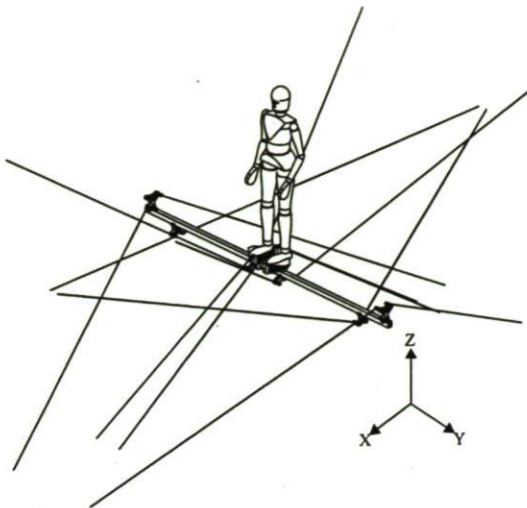


Figure 3.15: Modèle CAD du mécanisme complet [33]

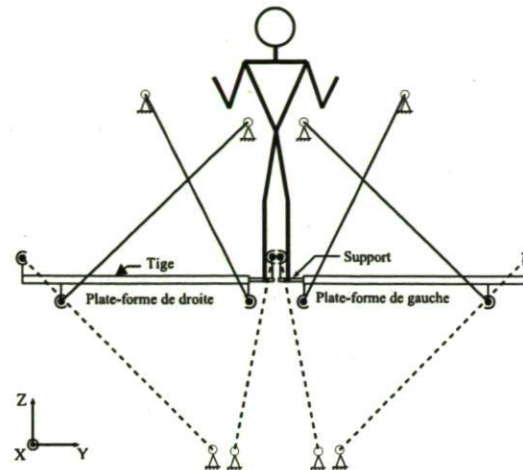


Figure 3.16: Vue de face du mécanisme complet [33]

Les plates-formes gauche et droite sont similaires, énantiomorphes (symétriques miroirs) et sont composées principalement de deux pièces selon la figure 3.19. La première pièce consiste à une plate-forme où le pied de l'utilisateur doit être fixé et où quatre câbles (les câbles 1-2-3-4 sur la figure 3.19) relient cette pièce aux enrouleurs. La seconde pièce consiste en une tige où les quatre autres câbles restants (câbles 5-6-7-8) sont attachés à l'autre extrémité de la plate-forme. La figure 3.17 montre la configuration réelle d'une plate-forme avec les aimants permanents sous le pied du robot avec le capteur d'efforts. Les aimants sont utilisés comme des limiteurs de couple pour éviter la destruction du robot lors de l'évaluation de certains algorithmes.

Tous les points d'attache de câbles sur la plate-forme sont considérés comme un joint sphérique avec de la friction négligeable. Sur les figures 3.16 et 3.18, les câbles dessinés en lignes pointillées sont orientés vers le bas par rapport à la plate-forme alors que ceux dessinés en ligne solide sont orientés vers le haut. Le poids estimé de chaque plate-forme avec les capteurs pour la version du mécanisme réel est de 15 kg alors que pour le prototype de dimension réduite 1 : 3, le poids est estimé à 1,5 kg.

Les autres interfaces de locomotion qui utilisent des plates-formes programmables contraintes dans les six DDL, tels que le K-Walker [121] et l'HapticWalker [122], utilisent elles aussi deux plates-formes identiques et symétriques bien que la biomécanique de la marche génère des trajectoires différentes entre chaque utilisateur et pour chaque

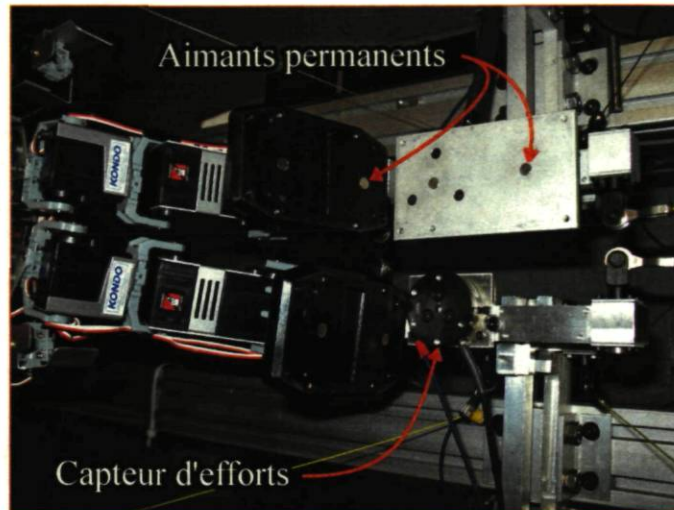


Figure 3.17: Position des aimants permanents et du capteur d'efforts sous le pied du robot marcheur

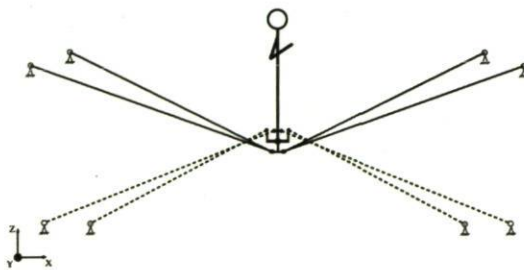


Figure 3.18: Vue de côté du mécanisme

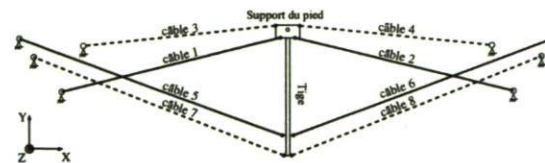


Figure 3.19: Vue de dessus d'une plateforme

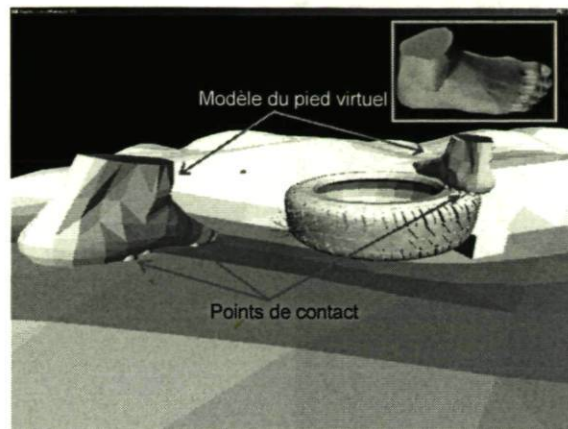


Figure 3.20: Modèle du pied virtuel en contact avec les objets virtuels

pied. L'algorithme du servocontrôleur doit donc être spécifiquement conçu pour la réhabilitation ou pour l'entraînement [123].

Le modèle virtuel du pied simulé à l'intérieur de l'environnement virtuel, montré à la figure 3.20, est mathématiquement relié à la plate-forme de marche haptique par un vecteur de translation et une matrice de rotation entre leur repère respectif. Ce vecteur et cette matrice de rotation sont modifiés et ajustés avec l'algorithme de rappel qui maintient l'utilisateur dans le centre de l'espace de travail physique de l'interface de locomotion. L'erreur de positionnement entre la plate-forme et le pied virtuel devrait se situer à l'intérieur de quelques millimètres. Cette valeur doit être faible pour plusieurs raisons. D'abord, lors de la marche, la distance entre le pied et le sol pendant le balancement devient très faible (de l'ordre du millimètre). Aussi, le système pourrait devenir instable à la limite du début ou de la fin d'un contact entre la plate-forme et le plancher virtuel. La précision du positionnement provient de plusieurs facteurs dont les erreurs des positions des points d'attache des enrouleurs lors de la calibration, le déplacement des positions d'attache pendant la marche (ces positions ne sont pas des points isolés puisqu'il y a des déformations mécaniques de l'enrouleur et de la structure de l'interface de locomotion) et l'élongation longitudinale des câbles. Cette erreur aura aussi un impact sur la précision de la gestion des interférences de même que sur la performance du rendu haptique.

Jusqu'à maintenant, les positions des attaches des câbles sont considérées fixes (points isolés) lors du calcul de la cinématique. Ces positions sont déterminées pour optimiser l'espace de travail et certains paramètres dont les interférences. L'espace de

travail est donc fixe et connu en tout temps et il est possible de modifier la commande de l'algorithme de rappel pour éviter de sortir de cet espace. Bien qu'il soit très complexe de gérer des points d'attache qui se déplacent dans le temps, surtout en ce qui concerne la précision de la position de l'effecteur et la variation de l'espace de travail, certains auteurs ont proposé des mécanismes avec des actionneurs mobiles [124]. Pour un mécanisme à câble, les avantages des points d'attache mobiles sont de limiter les interférences et d'augmenter l'espace de travail. Yamamoto discute des problèmes en ce qui concerne le calcul du problème géométrique inverse (PGI) lorsque les erreurs de positionnement sont considérées et lors de l'asservissement d'une trajectoire pour un mécanisme sous-constrain. D'un autre côté, Theodorakatos discute des problèmes du calcul du problème géométrique direct (PGD) [125].

3.5 Architecture logicielle de l'asservissement du servocontrôleur

L'architecture logicielle de l'asservissement de l'interface de locomotion est divisée en six étages tel que décrit par la figure 3.21 : 1) l'analyse de la stabilité, 2) le rendu haptique avec les compensations cartésiennes, 3) l'algorithme de rappel de 4 DDL [22, 126, 127], 4) le simulateur des tests (HIL & BIST ⁵), 5) l'optimisation de la distribution des tensions avec la gestion des interférences et 6) l'asservissement articulaire qui inclut les amplificateurs et les enrouleurs. Un étage supplémentaire qui n'a pas été implanté serait nécessaire pour l'acquisition des signaux analogiques : les filtres de décimation dans une couche logicielle pour permettre la mise en oeuvre d'un système d'acquisition et d'asservissement multi-cadence. Cette architecture résulte d'une étude des travaux réalisés dans la littérature et de plusieurs considérations physiques.

Le premier étage est un observateur de la stabilité pour l'interaction humain-machine qui a été étudié dans [128], dans le cas de l'utilisation d'un modèle, et dans [101], dans le cas de l'étude du transfert d'énergie. Le second étage est utilisé pour le rendu haptique cartésien [129]. L'entrée de cet étage est un torseur d'efforts obtenu à partir des contacts entre le pied virtuel et un objet virtuel qui agit comme contrainte sur la plate-forme mécanique. Ce torseur appliqué à la plate-forme est équilibré par des tensions positives

5. En anglais : *Hardware-in-the-loop* et *Built-in-self-test*

dans les câbles en utilisant un algorithme d'optimisation tel que décrit dans [130] ou [131]. Le résultat obtenu par cet algorithme est transmis comme une consigne d'entrée pour la commande en tension articulaire.

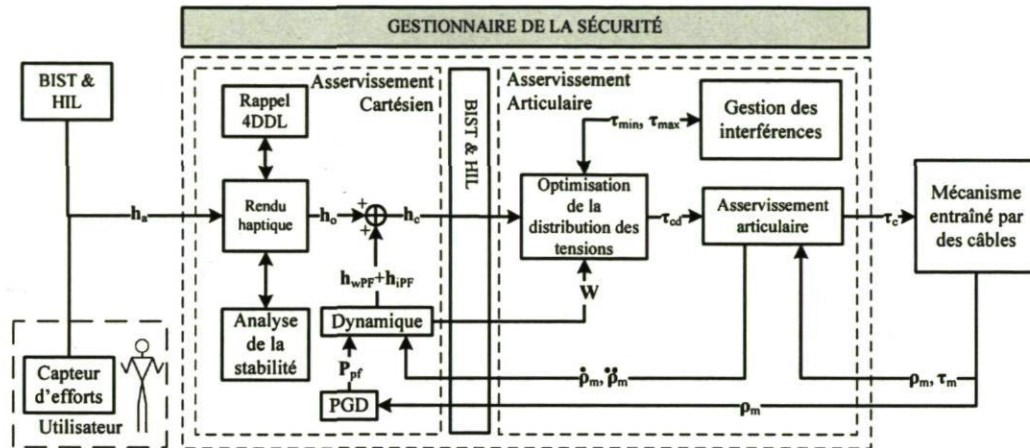


Figure 3.21: Description générale du processus de l'algorithme du servocontrôleur

En plus de l'asservissement des tensions articulaires, deux commandes cartésiennes seront utilisées : en impédance et en admittance. La commande en impédance reproduit les forces mesurées imposées par l'utilisateur sur les plates-formes. La mesure des efforts de l'utilisateur sur la plate-forme est effectuée pour annuler les erreurs de calcul du modèle cinématique (compensation d'inertie et de la friction) du mécanisme. Les deux commandes en impédance et en admittance peuvent s'effectuer en même temps dans une commande hybride pour une seule plate-forme. Il y a cependant un risque de déstabilisation puisque le changement brusque entre les deux modèles implique des sauts d'énergie et des erreurs de positionnement. Dans le but d'améliorer les performances de ce système asservi, *Cybernet*⁶ a développé un arrangement hybride adaptatif qui utilise des données de rétroaction pour mettre à jour les paramètres des modèles. Cette stratégie de commande adaptative est utilisée pour le dispositif haptique des pieds de Roston et Peurach. *CyberImpact*, le système de l'asservissement de *Cybernet*, utilise trois niveaux hiérarchiques : le servocontrôleur, l'environnement virtuel et le système mécanique à asservir. Les variables transmises entre chaque module sont la position (et l'orientation), les forces et les effets de la physique de l'EV. Le taux de rafraîchissement

6. <http://www.cybernet.com/>

est de 30 Hz avec l'EV et de 300 Hz entre le système de l'asservissement et le système mécanique [69]. D'autres systèmes commerciaux sont disponibles dont *CAREN software (Motek BV)*⁷ et *NASREM (Nasa/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System)*.

Lorsque la plate-forme atteint un objet virtuel, la détection de collision empêche la plate-forme de pénétrer dans l'objet par la commande en admittance dans la direction perpendiculaire à la géométrie des points de contact. Les autres directions, où il n'y a pas de contraintes, sont commandées en torseur inertiel nul, un cas particulier de la commande en impédance, pour favoriser le déplacement de la plate-forme.

Les trois capteurs disponibles sont un capteur d'efforts (torseurs) à l'effecteur pour mesurer les intentions du marcheur, un capteur de la tension dans un câble (à l'aide d'une jauge de déformation) dans l'enrouleur et l'encodeur de la position angulaire du moteur. Un retour tachymétrique sur la vitesse d'enroulement serait un capteur à ajouter pour améliorer la réponse de la boucle de rétroaction lors de la post-compensation de l'inertie et de la friction tant au niveau cartésien qu'au niveau articulaire.

3.5.1 Cinématique et dynamique du mécanisme

Le servocontrôleur inclut deux aspects théoriques : la cinématique et la dynamique du mécanisme entraîné par des câbles. Le modèle cinématique développe le problème de géométrie inverse (PGI) qui permet de faire le lien entre les coordonnées articulaires et les coordonnées cartésiennes de l'effecteur. La solution du problème géométrique direct (PGD) donne la pose de la plate-forme en fonction des longueurs des seize câbles délivrés par les enrouleurs, ainsi que la vitesse de l'enroulement [125].

Le modèle dynamique permet, pour sa part, de déterminer les tensions dans les câbles nécessaires pour maintenir et pour équilibrer les efforts appliqués sur la plate-forme. Ces efforts correspondent aux équilibres statique et dynamique, soit la somme du poids, de l'inertie de la plate-forme et de la consigne de l'utilisateur. Ensuite, la dynamique de l'enrouleur doit être considérée pour déterminer, à partir de la tension voulue dans le câble, le couple à produire par le moteur. Les équations de la cinématique

7. <http://www.e-motek.com/medical/>

et de la dynamique sont présentées dans le mémoire de Barrette pour un mécanisme plan et spatial [64] et elles sont reprises par Cantin [132] et par Côté [65].

3.5.2 Approche du calcul des interférences

Le calcul des interférences entre tous les câbles est essentiel et obligatoire. Considérant qu'il est nécessaire d'asservir tous les DDL de chaque plate-forme et qu'il faut demeurer dans l'espace des configurations polyvalentes, l'ajout de câbles est indispensable. L'approche de la gestion des interférences se base sur le choix de commander un câble à une tension minimale correspondant aux comportements physiques de ce câble. Patrice Lambert, ancien étudiant du laboratoire de robotique, a développé les équations qui permettent de détecter et de gérer les interférences dans l'utilisation simultanée de deux mécanismes parallèles actionnés par des câbles. Dans son travail, il a été décidé, lors d'une interférence, de relâcher l'un des deux câbles et de le tendre de manière à ce qu'il glisse sur l'autre câble qui servira de câble support [133]. Il y a donc trois états possibles pour un câble : **support**, **relâché** et **libre**. Un câble support travaille en tension sur l'effecteur et supporte un câble relâché qui est commandé en tension minimale.

Chaque fois qu'un câble sera relâché dû à une interférence, il peut se produire une variation des tensions dans les autres câbles pouvant générer des vibrations et des instabilités puisque le câble relâché n'intervient plus dans l'asservissement de la plate-forme. Pour cette raison, il est important de concevoir un système avec une redondance d'actionnement qui permettra de redistribuer efficacement les variations de tension tout en maintenant l'équilibre des efforts appliqués sur la plate-forme.

Le calcul d'une interférence est très simple : il suffit de calculer toutes les distances minimales entre tous les câbles et de vérifier si, à un certain horizon de prédiction, les distances s'approchent de zéro. Cet algorithme se base sur le fait que les points d'attache des actionneurs et les points d'attache sur les deux plates-formes sont connus. L'estimation du temps d'arrivée d'une interférence (ETAI) permet d'ajuster les tensions dans les câbles avant que l'événement se produise afin de réduire les problèmes d'instabilités.

Lambert propose aussi une méthode de calcul du point d'intersection et de glissement entre les câbles [133]. Ces calculs ne seront pas utiles dans le cas à l'étude. En effet, considérant que les longueurs des câbles sont connues en tout temps et que les points d'attache sont aussi connus, il suffit de comparer la longueur du câble relâché avec la norme du vecteur reliant ses deux points d'attache pour déterminer si l'interférence est terminée. À la limite, la distance calculée est nulle et la longueur du câble est égale à la norme du vecteur. Cette comparaison est très rapide et optimise le temps de calcul.

3.5.3 Algorithme d'estimation d'un événement

L'ajout d'algorithmes d'estimation⁸ sont utilisés pour améliorer la réponse de l'asservissement de l'interface de locomotion lorsque la commande désirée est connue. Dans le cas d'une commande en impédance, les positions des plates-formes peuvent pratiquement être considérées comme des perturbations puisqu'elles dépendent uniquement de l'intention du marcheur. Le système ne peut pas prévoir les intentions du marcheur sauf dans le cas où le mouvement cyclique des membres inférieurs et le mouvement des transitions entre les différentes formes de la démarche seraient modélisés. Une autre perturbation est le poids de l'utilisateur. En effet, si l'utilisateur saute, son poids relatif augmente lorsqu'il retombe sur le sol virtuel. Cette variation pourrait aussi être prévisible en fonction de l'estimation des collisions. Considérant que les perturbations ne sont pas mesurables mais qu'il est possible de les estimer (mais pas nécessairement par un modèle), une compensation par anticipation ne sera pas mise en oeuvre.

Dans cette optique, un algorithme d'estimation a deux rôles très importants. En effet, deux types d'algorithmes d'estimation pourraient être utiles. Le premier type, nommé **l'estimateur de collisions**, est nécessaire pour gérer les efforts haptiques à reproduire par la mécanique. Cet estimateur est souvent nommé prédicteur de collisions dans la littérature comme le suggère les deux articles [134, 135]. Dans cette thèse, le terme *estimation* est utilisé pour éviter la confusion avec la *commande prédictive* et les *algorithmes de prédiction*. Le deuxième type, nommé **l'estimateur de la pose d'une plate-forme**, est utilisé pour gérer les interférences entre les câbles, ou plus précisément, pour éviter les interférences hors domaine et pour conserver les

8. Ces algorithmes sont similaires à des prédictions, mais ils agissent sans modèle.

plates-formes dans l'espace de travail permis lors d'un contact avec un objet virtuel. L'estimation d'une pose de la plate-forme dans l'espace est réalisée avec l'estimation du temps d'arrivée d'une interférence (ETAI) qui est présentée à la section 6.3. Cet algorithme calcule l'intersection de deux hyperplans (dans l'espace-temps euclidien) représentant la trajectoire de chaque câble pouvant participer à une collision en utilisant les mesures connues des dérivées des trajectoires des plates-formes à un temps donné.

Ces deux algorithmes d'estimation sont très différents. D'ailleurs, ils sont implantés dans des niveaux hiérarchiques différents dans l'architecture logicielle de l'asservissement. La fonction d'estimation a comme entrée la position actuelle d'une plate-forme (ou de son pied virtuel correspondant) et comme sortie une série de valeurs en position égale à un horizon de prédiction. Dans le cas où la perturbation est entièrement modélisable, la fonction de prédiction sert directement de modèle, ce qui limite les calculs. Au contraire, une série de Fourier pourrait aussi être utilisée pour définir une trajectoire probante de la plate-forme comme le propose Schmidt (voir section 2.2.2 et la figure 2.5). Dans le cas de cette thèse, la trajectoire de la plate-forme est considérée aléatoire et aucun modèle n'est mis en oeuvre. En effet, il n'est pas possible de prévoir si le mouvement de la plate-forme correspond à une trajectoire de marche sur une surface plane ou une trajectoire pour déplacer un objet.

Un algorithme d'estimation de la pose d'une plate-forme est aussi utile pour le rappel. Dans ce cas, il faut estimer une position future à un temps très élevé, par exemple au quart du cycle de la démarche. Dans le cas où l'effecteur se dirige dangereusement à l'extérieur de l'espace de travail permis, l'algorithme de rappel doit déplacer l'utilisateur plus rapidement. Si cette opération est impossible, le système atteint une configuration hors-domaine et il doit immédiatement entrer dans un mode sécuritaire et passif.

3.5.4 Algorithme de rappel (*Washout*) et harnais (*tether*)

Il est utile de définir l'utilité du harnais et de l'algorithme de rappel. D'un côté, le harnais est un mécanisme avec au minimum 3 DDL (les trois translations cartésiennes sans les orientations). Les deux objectifs principaux du harnais sont de maintenir l'équilibre de l'utilisateur et de le ramener vers le centre de l'interface. Les travaux d'Hollerbach donnent plusieurs autres objectifs qui pourraient être utiles dans l'interface de loco-

motion. Considérant les limitations mécaniques du tapis roulant SARCOS, l'ajout du harnais est utilisé pour simuler les accélérations initiales [49], les pentes [50] et les escaliers [51] avec des forces dorsales de rétroaction. Le harnais est aussi utilisé lors des virages [52]. Entre autres, il pourrait être un bras robotique attaché dans le dos ou un ensemble de câbles attachés autour du centre de masse du marcheur. Les plus grands désavantages de l'utilisation des câbles dans la conception du harnais sont la gestion des interférences avec les câbles des deux autres plates-formes et la limitation du mouvement des membres supérieurs. L'utilisation de câbles autour de la taille pour la réhabilitation a déjà été proposée [25].

D'un autre côté, une des solutions envisagées pour l'algorithme de rappel ou *washout filter*⁹, est un filtre passe-haut qui élimine le régime permanent d'un système par l'ajout d'un zéro à l'origine et qui laisse passer le régime transitoire. Par conséquent, l'objectif du rappel est de transformer les trajectoires générées par la marche (qui incluent de très grands déplacements) par des commandes aux actionneurs qui donnent une sensation de mouvement réaliste tout en demeurant dans les limites physiques du simulateur [137].

9. Ce type de filtre existe depuis le début des années 1960 [136].

3.6 Conclusion

Ce chapitre présente les défis de la conception d'une interface de locomotion haptique avec un mécanisme parallèle entraîné par des câbles. En particulier, il est question d'élaborer un **mécanisme qui permet non seulement** une démarche naturelle dans un environnement virtuel, **mais aussi** qui facilite la simulation d'un plancher à topologie variable tout en étant omnidirectionnel. En premier lieu, la problématique est définie pour mieux situer le contexte d'utilisation de l'interface de locomotion. Par la suite, la modélisation de la démarche humaine est présentée pour fixer les spécifications dans le cahier des charges. En deuxième lieu, l'état actuel du projet est exposé. Dans cette section, les architectures mécanique et logicielle sont analysées pour mieux situer le lecteur pour la suite des chapitres de cet ouvrage.

Avec les architectures proposées, l'interface de locomotion répond à certains critères d'une marche naturelle. En effet, certaines contraintes du mécanisme qui sont établies dans le cahier des charges pourraient limiter la démarche de l'utilisateur. Ces limitations seront utiles lors des choix de la conception de l'architecture logicielle de l'asservissement dans le servocontrôleur pour éviter que les plates-formes sortent de ces contraintes. Bien que l'architecture soit relativement complète, plusieurs algorithmes restent à déterminer dont ceux du rappel avec le harnais, ceux des prédicteurs et la physique utilisée dans le monde virtuel, et, finalement ceux de la gestion des interférences entre les câbles.

La suite de cet ouvrage concerne l'intégration de l'architecture logicielle qui viendra résoudre les problèmes énumérés dans ce chapitre. Le prochain chapitre concerne la première phase de développement, soit le développement d'un algorithme qui sera utile pour atteindre la commande optimale articulaire et cartésienne du mécanisme. Cette commande optimale est ajustée avec une fonction de coût qui assurera une réponse similaire entre chaque enrouleur et entre chaque degré de liberté de la plate-forme.

Chapitre 4

Algorithme d'ajustement automatique de l'asservissement

Les commandes cartésiennes et articulaires des mécanismes parallèles redondants pour équilibrer les torseurs sur la plate-forme introduisent un modèle complexe du système mécanique. De plus, les non-linéarités comme la saturation des actionneurs (*i.e.* les limites sur le couple et la vitesse angulaire d'un moteur) impliquent qu'un système non-linéaire soit asservi. Un tel système est habituellement commandé de manière conservateur considérant la complexité de son modèle. Dans les applications haptiques où la transparence et la stabilité sont deux paramètres critiques et antagonistes, les meilleures performances devraient être atteintes. Ce chapitre introduit donc un algorithme d'ajustement automatique d'un FPID (PID avec filtrage de la consigne) basé sur l'*Extremum Seeking Tuning* (nommé dans le texte qui suit ES-Tuning) qui utilise une fonction de coût appropriée, selon cette application, pour trouver une solution locale pour le rendu haptique cartésien. Cette recherche d'extrémum permettra de développer une commande adaptative. La solution de cette procure un indice de la mesure de la transparence dynamique évaluée par la fonction de coût.

4.1 Introduction

Lors de la modélisation d'un mécanisme parallèle entraîné par des câbles, pour pouvoir employer correctement un algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions (ODT) dans les câbles, comme celui proposé dans [130] ou comme la programmation quadratique [138], les câbles sont considérés comme étant de simples droites n'étant pas affectées par la gravité. Cependant, un câble avec des caractéristiques physiques réelles telles que décrites dans [139] et [140], en plus de la déformation élastique de la structure du mécanisme et des non-linéarités du système de la mesure de la tension dans le câble, produit un système d'ordre élevé (dont les paramètres du modèle varient) pour lequel une commande performante est difficile à atteindre avec des méthodes d'ajustement standard des PID (comme la méthode de Ziegler-Nichols).

De plus, l'enrouleur pour le projet NELI a été conçu avec des moteurs de faible coût et un système d'acquisition analogique qui génère du bruit sur les mesures. La signature du bruit envoyé dans la procédure d'optimisation réduit l'efficacité de l'algorithme. Donc, pour augmenter la robustesse au bruit, l'ajustement final des paramètres du FPID du servocontrôleur est réalisée avec une version quelque peu modifiée de l'algorithme connu de l'*Extremum Seeking Tuning* (ajustement par une recherche d'extrémum).

Considérant les différences mécaniques entre les divers enrouleurs, la meilleure solution qui minimise la fonction de coût n'est pas nécessairement celle qui est recherchée. En effet, il pourrait être préférable de trouver une solution pour que chaque enrouleur ou pour que chaque degré de liberté cartésien obtienne un indice de transparence similaire ou voisin considérant l'anisotropie du mécanisme. Cet indice est calculé avec une fonction de coût à minimiser par l'algorithme de l'ES-Tuning. La conception de la fonction de coût définit un indice de performance relié à la mesure de la transparence dynamique qui est estimée par la réponse transitoire de la commande de la tension et par l'erreur entre une consigne et la mesure. **En effet, la transparence est habituellement associée par une absence de friction, d'inertie, de gravité ou de tout autre torseur parasite (comme une réponse transitoire) qui peut être ressenti par un usager pendant le mouvement du mécanisme haptique [141].** Elle inclut aussi l'impédance dynamique atteignable (Z-width, ou largeur de bande de l'impédance dynamique) [142] qui permet de simuler un objet virtuel le plus rigide possible. Cette dernière caractéristique sera couverte dans le chapitre 7.

Cette approche de recherche d'extrémum pourrait définir un critère de l'assurance qualité dans le cas d'une production massive. Ce chapitre tente de proposer une méthode qui assure la qualité de la réponse d'un enrouleur en augmentant la transparence dynamique de la boucle d'asservissement d'une manière automatique. Une version numérique légèrement améliorée de l'*Extremum Seeking Tuning*, similaire à celle retrouvée dans [143], est développée pour concrétiser cette approche. D'autres méthodes d'ajustement basées sur des modèles non-linéaires comme le IFT (*iterative feedback tuning*) peuvent être mises en oeuvre [144]. D'ailleurs, l'ES-Tuning et l'IFT donnent des résultats similaires selon [145]. Cependant, la procédure d'optimisation semble être plus efficace avec l'ES-Tuning puisqu'elle ne nécessite pas la connaissance d'un modèle [146].

La seconde section de ce chapitre montre un modèle de second ordre de la fonction de transfert de l'enrouleur et d'un degré de liberté cartésien pour évaluer les paramètres de départ d'un premier FPID. La troisième section présente l'architecture pour l'asservissement de la tension dans un câble. La quatrième section introduit l'amélioration de la méthode d'ajustement automatique selon l'ES-Tuning qui utilise une fonction de coût conçue pour les applications haptiques.

4.1.1 Système d'acquisition

Dans le cas de l'asservissement articulaire, l'architecture du servocontrôleur choisie consiste en un régulateur FPID légèrement modifié qui inclut des valeurs de précompensation pour la friction, l'inertie et la gravité du câble. La sortie du FPID, qui correspond à une valeur du couple du moteur, est envoyée à un servocontrôleur pour la commande du courant. Le servocontrôleur de courant opère à l'extérieur de l'ordinateur qui contient le gestionnaire de l'asservissement soit, dans un amplificateur de puissance pour un moteur DC spécialisé qui peut être considéré comme ayant un gain unitaire. La réponse du servocontrôleur de courant implique qu'il est acceptable d'ignorer les effets de l'inductance à l'intérieur du moteur ; une approximation qui simplifie grandement la fonction de transfert du système. Les données des tensions dans les câbles, mesurées par une jauge de déformation, sont acquises à l'aide d'un amplificateur 4-20mA. Les quatre amplificateurs qui asservissent les deux plates-formes avec l'ordinateur sont présentés à la figure 4.1. La figure 4.2 montre les connecteurs du système d'acquisition réel sur l'ordinateur. La courbe de correspondance entre la donnée lue par la jauge et la valeur



Figure 4.1: Les quatre amplificateurs et l'ordinateur qui contient le servocontrôleur

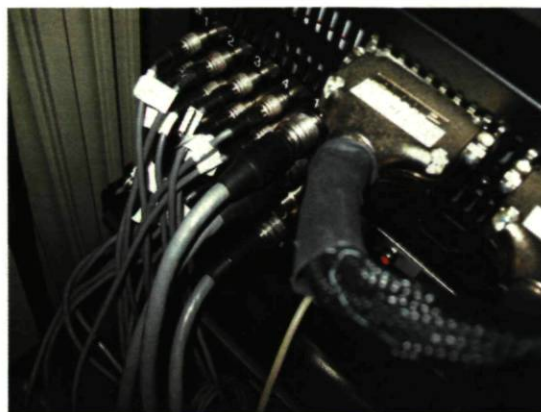


Figure 4.2: Connecteurs à l'arrière de l'ordinateur pour l'acquisition des signaux analogiques des amplificateurs 4-20mA

de la tension acquise est préalablement déterminée avec une régression quadratique aux moindres carrés lors de la calibration et de l'étalonnage du mécanisme.

D'un autre côté, soit celui de l'asservissement cartésien responsable du rendu haptique, l'architecture consiste en un FPID parallèle qui inclut des valeurs de précompensation pour la masse et l'inertie de la plate-forme de marche utilisée pour déplacer le modèle du pied dans l'environnement virtuel. La valeur obtenue à la sortie du FPID est envoyée à l'algorithme d'optimisation de la distribution des tensions (ODT) dans les câbles. Dans le cas où l'asservissement articulaire et le servocontrôleur en courant du moteur sont parfaits (les deux boucles de rétroaction peuvent être modélisés avec un gain unitaire), l'asservissement n'est donc essentiellement appliqué que sur le modèle de l'environnement virtuel et de l'interaction ou de la collaboration avec l'humain. Sinon, l'asservissement sert à améliorer la réponse articulaire et donc sa performance lors de l'imposition d'une trajectoire prédéterminée.

4.2 Fonction de transfert d'un enrouleur

Puisque le matériel principal qui interface l'ordinateur responsable de l'asservissement et les enrouleurs utilise une commande en courant, la fonction de transfert du couple du moteur peut être considérée comme un simple gain constant. Donc, la réponse transitoire mesurée par la jauge de déformation pour une entrée à l'échelon est principalement due aux propriétés élastiques de la jauge elles-mêmes combinées à l'inertie de l'enrouleur et du moteur de même que la contribution parasite de la structure de l'enrouleur et du module de Young du câble qui lui est relié.

4.2.1 Approximation au second ordre

Il est possible de déterminer une fonction de transfert $F(s)$ du second ordre sous-amortie pour modéliser l'enrouleur. En effet, puisque la jauge de déformation a une masse négligeable en comparaison à celle du tambour de l'enrouleur et du rotor du moteur DC, il est possible d'inclure les effets de l'élasticité du câble et de l'enrouleur dans une constante de Hooke générale. De plus, l'inertie globale du système peut se déterminer théoriquement en considérant toutes les pièces en mouvement incluant aussi le câble. Cette fonction de transfert permet d'approximer la réponse de l'enrouleur à des fréquences inférieures aux fréquences de résonance de la jauge de force (soit de 300 Hz, ce qui correspond approximativement à la fréquence de Shannon-Nyquist du système d'acquisition) et du câble :

$$F(s) = T \frac{1}{s^2 + \frac{b_m}{J_m} s + \frac{k_m}{J_m}} = T \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (4.1)$$

où b_m est la constante de friction visqueuse équivalente, J_m est l'inertie de rotation totale vue à l'axe du moteur, k_m est la constante de Hooke équivalente, ζ est la constante d'amortissement et ω_n est la pulsation naturelle. Ce modèle est utilisé comme point de départ pour déterminer les paramètres initiaux du FPID avant l'ajustement automatique par la recherche d'extrémum proposé dans ce chapitre.

En ce qui concerne chacun des axes cartésiens, il est beaucoup plus complexe de

déterminer ce type de fonction. En fait, cette fonction de transfert n'est évaluée qu'expérimentalement.

4.2.2 Estimation expérimentale de la fonction de transfert

La procédure expérimentale utilisée dans la procédure de calibrage pour déterminer les paramètres de la fonction de transfert de l'équation 4.1 est résumée comme suit :

- l'inertie de rotation est calculée en mesurant l'accélération angulaire maximale de l'axe du moteur pour une commande connue en boucle ouverte précalibrée ;
- la constante de friction visqueuse est déterminée en attendant la stabilisation de la vitesse du moteur à 80 % de sa valeur maximale (dans ce cas, cette valeur est limitée en tension par une diode qui détermine la valeur maximale du CEMF). La mesure du taux de variation de la vitesse pour une consigne nulle avec un ajustement d'une courbe exponentielle donne une approximation de la friction visqueuse¹ ;
- finalement, la constante de Hooke équivalente est déterminée en mesurant la pulsation d'oscillation ω_{osc} pour une entrée à l'échelon :

$$k_m = \frac{b_m^2}{4J_m} + J_m \omega_{osc}^2. \quad (4.2)$$

Il est aussi possible de déterminer la constante de Hooke avec le diagramme de Bode de sorte à extrapoler la pulsation de résonnance du système ω_R :

$$k_m = \frac{b_m^2}{2J_m} + J_m \omega_R^2. \quad (4.3)$$

Le modèle proposé à l'équation (4.3) est utilisé comme point de départ pour déterminer les paramètres d'un FPID en utilisant la méthode proposée dans [147] avant

1. Cette expérience assume que la fonction de transfert de la vitesse angulaire du moteur est de premier ordre par rapport à la commande envoyée par le FPID, ce qui est valide puisque le moteur est commandé en courant.

l'ajustement automatique [145] lors de la procédure de calibrage présentée dans le chapitre 5.

4.3 Architecture de l'asservissement articulaire

L'architecture du servocontrôleur pour la commande de la tension dans un câble est basée sur une version légèrement modifiée du servocontrôleur décrit dans [145]. Ce servocontrôleur inclut tous les termes de précompensation ainsi qu'un filtre passe-bas pour la consigne. Dans le domaine de la transformée de Laplace, $G(s)$ est le procédé à asservir, $C_y(s)$ est une transmittance de type PID idéale et C_r est son homologue sans dérivée PI :

$$C_y(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \text{ et} \quad (4.4)$$

$$C_r(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.5)$$

où les trois paramètres du PID sont $P = K$, $I = K/T_i$ et $D = K T_d$. Le terme $T_d s$ de $C_y(s)$ ne se réalise pas en pratique. Il est habituellement remplacé par un avance de phase ou par l'ajout d'un filtre dans le calcul de la dérivée numérique. Le système est conçu de telle sorte que la fonction de transfert en boucle fermée $T(s)$ devient :

$$T(s) = \frac{G(s)C_r(s)}{1 + G(s)C_y(s)}. \quad (4.6)$$

4.4 Ajustement automatique de l'asservissement articulaire

Les paramètres du régulateur FPID sont optimisés en minimisant localement une fonction de coût qui décrit la précision de la sortie du servocontrôleur selon une consigne

en échelon. Deux méthodes sont investiguées. La première est la version modifiée de l'algorithme de l'ES-Tuning qui calcule le gradient d'une fonction de coût utilisant une combinaison de deux filtres numériques passe-bas et passe-haut afin d'extraire les informations de la quasi-modulation d'amplitude pour déterminer les paramètres du FPID ($F = \tau_f$, $P = K$, $I = K/T_i$ et $D = KT_d$). La deuxième méthode utilise un algorithme standard qui extrapole ce gradient avec l'aide d'une régression (moindres carrés multidimensions) d'un ensemble de points voisins dans l'espace des paramètres du FPID. La méthode de l'ES-Tuning devrait converger plus rapidement que celle des moindres carrés puisque cette dernière doit accumuler un nombre de points voisins suffisant dans l'espace des paramètres du FPID afin de calculer le gradient. Cependant, l'écart entre les deux méthodes est expérimentalement très petit due à la mesure inhérente du bruit. Ce bruit favorise donc une méthode robuste plutôt que rapide.

4.4.1 Transparence et fonction objective de coût

Dans une application où les tensions dans les câbles doivent être commandées, les dépassements de la consigne doivent être évités tout en conservant une réponse avec peu d'amortissement. En règle générale, la conception d'une fonction de coût significative nécessite habituellement de régler le temps de réponse et le temps de montée de la réponse du servocontrôleur tout en minimisant le dépassement. Il est possible de combiner en une équation les deux fonctions de coût usuelles ISE (*integral square error*) ou ITSE (*integral time-square error*), décrit dans l'équation (4.8), en utilisant une fonction de pondération sigmoïde de telle sorte que la portion transitoire soit pondérée par rapport au temps de montée :

$$J(\theta(t)) \equiv \frac{J_{ITSE}(\theta(t)) + \frac{1}{t_s - t_0} \int_{t_0}^{t_s} \frac{1}{1 + e^{\pi(t-t_s)/(2t_s)}} \epsilon^2 dt}{J_1(t)}, \text{ avec} \quad (4.7)$$

$$J_{ITSE}(\theta(t)) = \frac{1}{t_s - t_0} \int_{t_0}^{t_s} t \epsilon^2 dt, \quad (4.8)$$

où $J(\theta(t))$ est la fonction de coût, $\theta(t)$ représente les paramètres du régulateur FPID à optimiser sur le temps d'exécution t de l'algorithme, $J_1(t)$ est la fonction de coût évaluée pour un système d'ordre 1, ϵ est l'erreur entre la consigne de la tension (référée par r) et

la mesure donnée par la jauge d'effort (la sortie y), $t_s - t_0$ est le fenêtrage de l'intégration et $\pi/2$ ajuste la courbe de la fonction sigmoïde. La sigmoïde réduit le besoin d'ajuster précisément la constante t_s pour arriver à la réponse désirée. t_s est plutôt choisi comme une valeur qui est extrapolée directement de la pulsation naturelle du modèle de second ordre utilisant la relation simple $t_s \leq 2\pi/\omega_n$. La condition $J(\theta(t)) < J_{max}^2$ doit être vérifiée en tout temps pour assurer que l'algorithme n'entre pas dans une région instable. Dans la version numérique de l'algorithme de l'ES-Tuning, la fonction de coût $J(\theta(t))$ devient $J(\theta)_{[k]}$.

De cette manière, $J(\theta(t))$ donne une mesure sur la transparence dynamique et la performance de l'enrouleur avec une considération sur la dynamique (le fenêtrage de l'intégration $t_s - t_0$, le temps de montée et le dépassement) et sur l'erreur de la tension dans le câble ϵ .

4.4.2 Mise en oeuvre pratique de l'ES-Tuning

Les modifications apportées à l'algorithme de l'ES-Tuning découlent de la nécessité de l'adaptation de la procédure décrite dans [145] pour un mécanisme entraîné avec des câbles dans lequel la répétabilité imparfaite de la sortie d'un enrouleur pour une consigne se traduit par une mesure importante de bruit sur la fonction de coût. Ce bruit doit être considéré afin d'assurer la convergence vers un minimum local. La constante de temps τ_f du filtre d'entrée du FPID est ajoutée comme un paramètre supplémentaire ajustable de manière à ce que le lissage de la réponse du FPID puisse être ajustée selon la fonction de coût qui est employée. Ce filtre est aussi nécessaire pour diminuer les transitions importantes (discontinuités) de la consigne afin de réduire les vibrations des câbles et du mécanisme. De plus, pour restreindre les paramètres à des valeurs positives et pour permettre leur ajustement sur une grande plage de valeurs initiales, le logarithme naturel de chaque paramètre est envoyé à l'algorithme de l'ES-Tuning. Cette astuce réduit le comportement pathologique pour une variation très faible des valeurs où le pas de discrétisation de l'intégrateur numérique du gradient devient trop important. Cette procédure relâche quelque peu les contraintes sur le choix des trois constantes de l'algorithme de l'ES-Tuning, soient l'index de modulation α_i , la pulsation de modulation ω_i et l'intégrateur du gradient γ_i pour chaque paramètre du FPID (i

2. J_{max} est déterminée expérimentalement.

4.4.3 Paramètres d'entrées de l'ES-Tuning

Pour déterminer le FPID initial à utiliser au début de la procédure, la fonction de transfert de second ordre décrite par l'équation (4.1) est utilisée selon la méthode décrite dans [147]. En ce qui concerne les paramètres initiaux de l'algorithme de l'ES-Tuning (α_i , ω_i , γ_i et les constantes de temps des filtres passe-haut $|T_h|$ et passe-bas $|T_l|$), ils doivent être déterminés non seulement pour obtenir le meilleur temps de réponse de l'algorithme mais pour aussi minimiser la signature du bruit, ce qui constitue un compromis important.

Le filtre passe-haut doit être ajusté tel que la pulsation de coupure soit la plus élevée possible afin d'accélérer la réponse du filtre impulsionnel dans le domaine temporel. Ce filtre passe-haut a la structure suivante :

$$T_h = \eta \left(\frac{z-1}{z+h} \right), \text{ avec} \quad (4.14)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{(h-1)^2}{4}} \quad (4.15)$$

où η est le facteur de normalisation, et

$$h = \begin{cases} \frac{\sin \omega_c - 1}{\cos \omega_c} & \text{si } \omega_c \neq \pi/2 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (4.16)$$

définit la pulsation de coupure. Ce filtre peut être exprimé dans le domaine temporel selon la fonction récursive suivante :

$$y[n] - hy[n-1] = \eta(x[n] - x[n-1]) \quad (4.17)$$

et sa constante de temps peut être caractérisé en analysant la réponse à l'échelon $x[n] = H[n]$. Dans ce cas, $x[n] - x[n-1] = 0$, $\forall n > 0$, et $y[0] = \eta$. Ce qui signifie que :

$$y[n] = hy[n-1] = (\text{sgn } h)^n |h|^n \eta. \quad (4.18)$$

Donc, la constante de temps défini par N_h pour $|y[N_h]| = e^{-1}\eta$ est :

$$N_h = \log_h |h|^{N_h} = - \lim_{l \rightarrow |h|} \frac{1}{\ln(l)}. \quad (4.19)$$

La contrainte sur h est que $\omega_c \leq \min(\omega_i)$ de manière à ce que les composantes modulées de $J(\theta)_{[k]}$ ne soient pas filtrées. A priori, il semble donc que choisir la plus petite pulsation ω_i supérieure à $\pi/2$ pourrait être la meilleure solution (puisque N_h est minimum pour $h = 0$), mais ce n'est pas toujours le cas. Lorsque le processus de démodulation est complété et lorsque l'amplitude du signal modulé à ω_i est déplacée vers la bande de base³, il est impératif de couper non seulement les autres composantes fréquentielles $\omega_{j \neq i}$ en utilisant un filtre passe-bas, mais aussi toutes les harmoniques qui découlent de la non-linéarité de $J(\theta)_{[k]}$ par rapport à ses paramètres. En fait, $J(\theta)_{[k]}$ peut être exprimé comme une série de Taylor, et donc toutes les composantes fréquentielles du signal modulé seront convoluées dans une certaine mesure en passant par $J(\theta)_{[k]}$, à moins que les amplitudes α_i soient les plus faibles possible.

Finalement, plus ω_i est proche de la fréquence de Nyquist, plus les composantes fréquentielles seront proches l'une de l'autre, ce qui signifie que le filtre passe-bas devra être de meilleure qualité afin de couper les harmoniques indésirables de la bande de base après la démodulation. Le problème est que α_i doit être limité par le bas pour assurer que le niveau du bruit ne noie pas les signaux modulés désirés, ce qui rend incoutournable l'utilisation d'un filtre passe-bas.

4.4.4 Conception et choix des paramètres d'optimisation

Selon la conception originale de l'ES-Tuning, le filtre passe-bas est simplement un intégrateur, ce qui signifie que la réponse en fréquence est simplement :

3. En anglais : *baseband*

$$|T_l| = \frac{\gamma}{\sqrt{2(1 - \cos \omega)}}, \quad (4.20)$$

avec une réponse nulle à la fréquence de Shannon-Nyquist. Si l'intégrateur somme la composante DC pour un temps suffisamment long, alors les composantes fréquentielles qui ne sont pas dans la bande de base seront effectivement supprimées. Cependant, le temps requis pour l'intégration du signal dans la bande de base à partir de ω_i doit être supérieur à la période de toutes les composantes dans la bande de base décalée.

De plus, toutes les oscillations provisoires de l'intégrateur causées par ces harmoniques indésirables peuvent potentiellement interférer avec le processus de la modulation de la fonction de coût $J(\theta)$. À moins qu'un soin particulier n'assure que les harmoniques situées dans la bande de base ne correspondent pas à aucune valeur de ω_i , ou ne réduise grandement les termes d'intégration γ_i de manière à ce que le changement progressif de $J(\theta)$ n'est pas significatif proche de la modulation d'amplitude de $J(\theta)$.

Plus précisément, s'il est déterminé qu'un paramètre de modulation d'amplitude α_i génère une oscillation dans la fonction de coût d'une amplitude de $\beta_i(\alpha_i)$, alors la bande de base idéale, qui inclut la composante DC, après la démodulation avec un filtrage passe-bas parfait, devrait avoir une amplitude de $\beta_i(\alpha_i)$. Donc, $\gamma_i < \kappa_i \alpha_i / \max(\beta_i(\alpha_i))$, où $0 < \kappa_i \ll 1$ devrait être satisfait, ce qui limitera la vitesse à laquelle $J(\theta)$ peut converger. Une règle simple en découle : κ_i peut être ajusté de manière à ce que la variation du paramètre après $2\pi / \min(\omega_i)$ échantillons est inférieure à α_i , c'est-à-dire, $\kappa_i < \min(\omega_i) / 2\pi$. Il est possible de choisir les composantes fréquentielles ω_i de sorte que dans le cas où la non-linéarité de $J(\theta)_{[k]}$ est limitée par un terme quadratique, les termes fréquents résultants ($\omega_i, 2\omega_i, \omega_i + \omega_j, \omega_i - \omega_j$) ne chevauchent pas les pulsations fondamentales $\omega_i \forall i$. C'est pourquoi la relation $\omega_i = \pi a^i$, où $0 < a < 1$, est utilisée.

Supposons que le design nécessite un filtre passe-haut avec une constante de temps la plus rapide possible. Aussi, en vue de garantir que la plus faible pulsation pour un système à optimiser à quatre paramètres (ω_4) est supérieure à $\pi/2$, a est choisi de manière à ce que $a^{1/4} > 0,5$, c'est-à-dire $a > 0,841$. Un exemple d'une valeur acceptable pourrait alors être de $a = 0,88$. La distance maximum entre les harmoniques et les pulsations désirées ω_i , considérant l'effet du repliement spectral, est numériquement vérifiée à un minimum de $0,04\pi$.

En ce qui concerne les considérations sur le bruit, il est impératif de garantir que les amplitudes β_i sont suffisamment élevées de manière qu'elles soient différentiables du bruit blanc Gaussien sur la plage de pulsation $0 \leq \omega \leq \pi$. Par conséquent, des constantes de ratio minimum du SNR ς_i , sur lesquels tous les autres paramètres seront basés, sont définies entre les composantes de β_i et du bruit actuel de la fonction de coût $J(\theta)_{[k]}$ (considéré comme acceptable). Connaissant que le bruit est trouvé dans le signal démodulé et qu'il est transmis à court terme par le biais des intégrateurs, affectant ainsi directement la valeur de $J(\theta)$ dans les prochaines itérations, la condition $\varsigma_i > \varsigma$ pour le pire cas $\kappa_i = 1$, où $\varsigma \geq 1$ est une constante décrivant la qualité globale de la fonction de coût, est imposée pour tous les β_i . En effet, ceci assure au moins que pour le cas $\varsigma = 1$, il n'y a pas de *marche aléatoire*⁴ dans l'espace des paramètres, puisque la bande de base correspondant à chaque ω_i a être intégrée aura toujours au moins un signe dans la bonne direction. Dans le cas où $\kappa_i < 1$, seulement la partie du bruit spectral sous la pulsation critique $\pi\kappa_i$ doit être considérée, puisque la densité spectrale de bruit est réduite par un facteur de κ_i , et donc $\varsigma_i > \varsigma\kappa_i$.

L'évaluation plus précise de ς_i pourrait considérer aussi la réduction de la densité totale du bruit suite au filtrage passe-haut, mais ceci entraîne des conditions moins contraignantes, et n'affecte donc pas les résultats négativement. En d'autres termes, l'effet du filtre passe-haut peut être considéré comme une marge de sécurité pour l'algorithme.

Conservant toutes ces contraintes dans l'équation et que les incertitudes sur les valeurs des paramètres optimaux du FPID dans l'espace logarithmique sont ultimement proportionnelles à α_i , il est nécessaire d'ajuster α_i correctement. Ces valeurs α_i sont choisies de manière à être plus petites qu'une valeur relative de précision ε , laquelle, dans l'espace logarithmique de base e , est dans ce cas fixée à 0,07 (c'est-à-dire fixée à un facteur de réduction de 0,93 ou 1,07 approximativement en fonction de l'amplitude de chaque paramètre). De telles petites valeurs permettront non seulement d'obtenir une bonne précision sur les paramètres optimaux, mais garantissent aussi que la variation locale des paramètres est dans une première approximation bilinéaire et non logarithmique. Toutefois, c'est insuffisant pour faire face au bruit sur la fonction de coût. Ce qui signifie que des mesures supplémentaires doivent être prises pour réduire

4. En mathématiques et en physique théorique, une marche au hasard est un modèle mathématique d'un système possédant une dynamique discrète composée d'une succession de pas aléatoires, ou effectués au hasard.

l'influence de ce bruit.

4.4.5 Réduction du bruit de boucle

La meilleure façon d'agir sur le SNR de la fonction de coût est simplement de la sous-échantillonner N fois afin d'obtenir une atténuation sur l'amplitude du niveau de bruit de \sqrt{N} , au coût d'augmenter le temps de réponse de l'algorithme d'un facteur N . Une autre méthode serait d'ajouter un second filtre passe-bas entre le démodulateur et l'intégrateur de manière à filtrer le bruit dans la zone des hautes fréquences tout en réduisant l'effet des harmoniques dans la bande de base. Considérons le filtre passe-bas IIR de la forme :

$$T_l = \frac{1 + z^{-1}}{\left(1 + \frac{2}{\omega_c}\right) + z^{-1} \left(1 - \frac{2}{\omega_c}\right)}. \quad (4.21)$$

Les propriétés de ce filtre dans le domaine du temps peuvent être déterminées facilement en observant qu'il est une transformation bilinéaire de l'équivalent de la transformée de Laplace pour un simple filtre de premier ordre avec une pulsation de coupure correspondant à son homologue ω_c . Dans ce cas, le dégauchissement⁵ n'est pas nécessaire puisque $\omega_c \ll \pi$, ce qui est nécessaire afin que le filtre devienne un antiparasite efficace contre le bruit et les harmoniques.

Par conséquent, l'ajout d'un filtre passe-bas est la méthode favorisée, puisque contrairement à la méthode de sous échantillonnage, ce filtre permet de *diminuer la constante de temps du filtre passe-haut* en ajustant $N_l = N_h$. Cette opération permet d'utiliser des valeurs de pulsations plus faibles pour ω_i , ce qui, à son tour, améliore la capacité de discrimination du filtre passe-bas.

5. En anglais : pre-warping

4.5 Amélioration de l'algorithme

L'algorithme d'optimisation peut être configuré de plusieurs manières. Une solution possible est développée pour permettre l'ajustement automatique de l'asservissement articulaire. Pour résumer les modifications apportées à l'ES-Tuning, voici une courte description d'une configuration possible :

- les quatre paramètres initiaux $\theta_{i[k=0]}$ sont calculés selon la méthode proposée dans [147];
- toutes les valeurs de α_i sont initialement mises à la valeur $\varepsilon \approx 0,07$;
- le SEM (i.e. le bruit) et la déviation standard correspondante de la fonction de coût sont évalués par la réponse à l'échelon aux valeurs initiales de $\theta_{i[k=0]}$ après que la sortie du servocontrôleur ait atteint une valeur moyenne stable;
- la déviation standard de la fonction de coût est évaluée avec plusieurs entrées en échelon pour les paramètres initiaux du FPID;
- les deux filtres passe-haut et passe-bas sont initialisés;
- ajuster les valeurs initiales α_i individuellement;
- démoduler une première fois le signal après N_h échantillons pour ajuster les valeurs de ω_i ;
- calculer $\varsigma / \min(\varsigma_{ir})$, où ς_{ir} sont les valeurs SNR de la fonction de coût $J(\theta)$ pour chaque paramètre. Puisque $\varsigma_i > \varsigma_{\kappa_i}$, et que $\kappa_i^{-1} = N_h = N_l$ est admissible, on peut conclure que $\kappa_i^{-1} = N_h = N_l = \sqrt{\varsigma / \min(\varsigma_{ir})}$;
- la pulsation angulaire constante ω_i pour chaque paramètre est ajustée selon la règle définie dans [145] où $\omega_i = \pi a^i$, pour $0 < a < 1$, de manière à minimiser le couplage mathématique non-linéaire entre les différentes composantes spectrales. La valeur minimale de a qui maximise la distance entre les largeurs de bande (pour minimiser le recouvrement spectral de la première et de la deuxième harmoniques) de la fonction de coût $J(\theta)$ doit être déterminée.
- les filtres passe-haut et passe-bas ainsi que le paramètre d'intégration selon la valeur choisie pour κ_i doivent être réajustés.

La vitesse de convergence de l'algorithme n'est cependant pas suffisamment élevée puisque la précision est préférée au détriment de la vitesse. La section suivante présente une méthode simple d'ajustement automatique des paramètres offrant une bonne précision tout en conservant une vitesse de convergence adéquate.

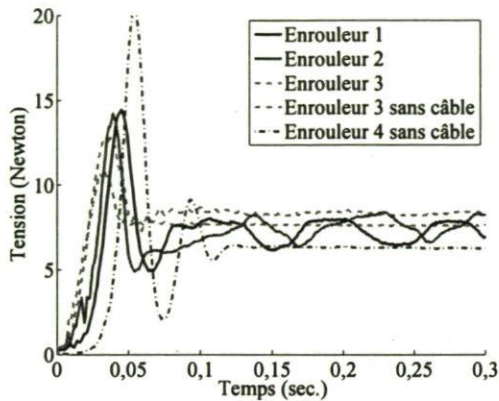


Figure 4.4: Réponses transitoires de quatre enrouleurs différents couplés avec la structure du mécanisme

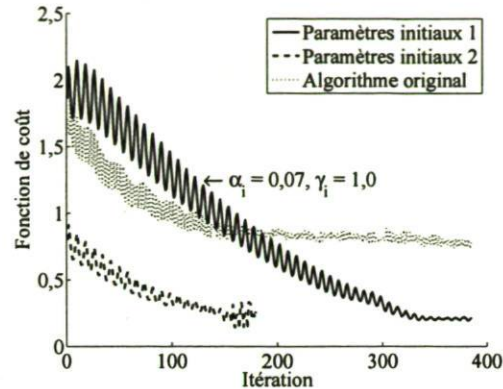


Figure 4.5: Évolution de la fonction de coût

4.6 Étude de la performance de l'algorithme d'optimisation

La figure 4.4 montre les réponses transitoires d'une même entrée en échelon de trois enrouleurs similaires avec des longueurs de câbles et des points d'attache différents sur la structure mécanique. Un enrouleur, couplé avec son câble, a une réponse qui varie selon la tension appliquée, la longueur du câble et la position où l'enrouleur est installé sur la structure mécanique. Le problème associé à la modélisation d'un système non-linéaire justifie le développement et l'étude d'un algorithme d'optimisation pour obtenir les meilleures performances d'un périphérique haptique. Évidemment, un modèle d'ordre élevé devrait être utilisé avec le comportement réel d'un câble et de la structure mécanique, mais ce travail ne sera pas nécessaire puisque l'ajustement final des paramètres du FPID sera obtenue avec l'ES-Tuning.

La figure 4.5 présente l'évolution de la fonction de coût qui converge ultimement vers un minimum local selon les valeurs initiales des paramètres du FPID. Les résultats finaux de l'optimisation dépendent des valeurs initiales et du choix de l'amplitude de α_i et γ_i . En effet, un mauvais choix de α_i et γ_i pourrait empêcher l'algorithme de converger vers une solution ou le rendre instable comme le montre la figure 4.6. Dans le cas de la simulation présentée à la figure 4.5, les valeurs de α_i et γ_i sont relativement faibles et le temps de convergence est plutôt long mais la précision des paramètres du FPID est

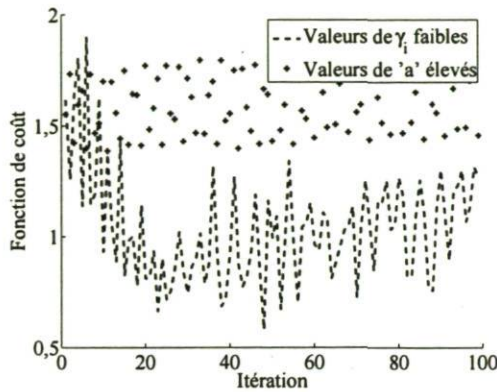


Figure 4.6: Évolution de la fonction de coût lors d'un mauvais ajustement des paramètres

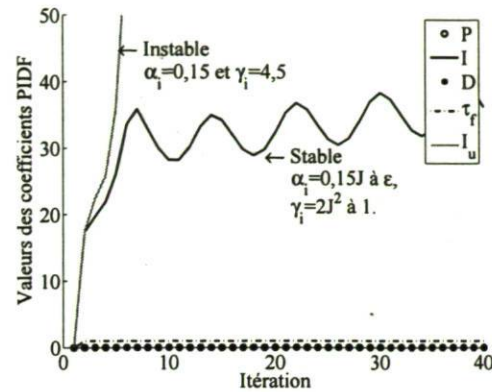


Figure 4.7: Évolution des paramètres PIDF avec et sans la variation automatique de α_i et γ_i

accrue. L'algorithme termine son exécution lorsque la régression linéaire des dernières valeurs de $J(\theta)_{[k]}$ passe par une pente nulle et augmente par la suite. Le nombre de points utilisés pour la régression linéaire dépend du temps de convergence.

La prochaine étape est de trouver un moyen pour accélérer le temps de convergence tout en conservant une bonne précision sur les paramètres finaux de FPID. À partir des résultats précédents, lorsque α_i et γ_i ont des valeurs élevées, la valeur du coefficient de l'intégrateur augmente trop rapidement, comme le montre la figure 4.7, ce qui déstabilise le servocontrôle. Cependant, les valeurs passent rapidement vers le point d'opération minimum, ce qui indique une possibilité de diminuer le temps de convergence. Les deux valeurs α_i et γ_i doivent donc être ajustées en temps réel en fonction de $J(\theta)$. Ainsi, si $J(\theta)$ diminue, α_i et γ_i doivent aussi diminuer pour ajuster précisément chaque valeur du FPID, comme le montre la figure 4.8.

Finalement, le résultat de l'optimisation obtenue par un ajustement adaptatif de la convergence en fonction de $J(\theta)$ est analysé pour une consigne en tension de type sinusoïdal (avec une fréquence de 0,4 Hz). Ce signal d'entrée représente bien le mouvement qu'un usager peut appliquer au mécanisme. La figure 4.9 montre une comparaison entre les paramètres initiaux et finaux du FPID lorsque l'enrouleur est commandé en tension et que la longueur du câble est fixée. L'objectif principal de l'algorithme d'optimisation est d'augmenter la transparence de l'enrouleur, soit d'augmenter le temps de réponse tout en réduisant les dépassements. La dernière figure montre que l'objectif est atteint

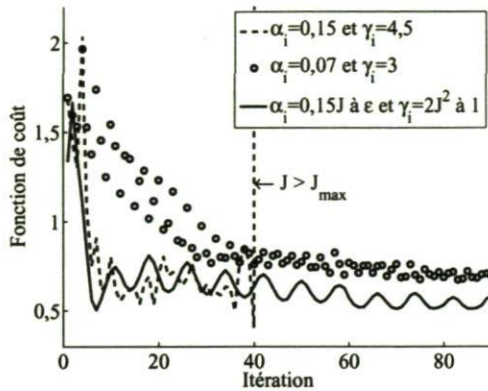


Figure 4.8: Évolution de la fonction de coût lors d'un ajustement automatique des paramètres α_i et γ_i

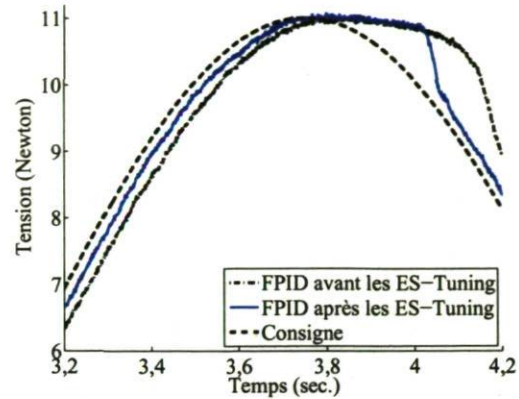


Figure 4.9: Réponse de la tension dans un câble pour une consigne sinusoïdale (0,4 Hz)

bien que la réponse de l'enrouleur semble demeurer relativement longue. Sur la figure, on note aussi à la quatrième seconde que l'erreur de tension augmente considérablement. Ce comportement s'explique principalement par l'hystérésis de la friction qu'il est impossible de compenser puisque cette réponse est statique (la longueur du câble est fixe). D'autres causes de ce comportement pourraient être la déformation mécanique de chaque pièce de l'enrouleur et la rigidité du câble. De telles non-linéarités diminuent la performance de l'asservissement. Le prochain chapitre présente des avenues pour corriger quelques-uns de ces problèmes. Ces résultats démontrent cependant que le choix de conception mécanique de l'enrouleur doit être révisé pour des applications haptiques.

4.7 Conclusion

Ce chapitre présente un algorithme d'optimisation très simple de mise en oeuvre dans un système complexe d'ordre élevé et non-linéaire. Deux niveaux d'asservissement doivent être optimisés, soient l'asservissement articulaire (par une commande de la tension dans un câble) et l'asservissement cartésien (pour le rendu haptique dans les 6 DDL). L'asservissement articulaire est celui qui a été couvert dans ce chapitre. En ce qui concerne l'asservissement cartésien, des modèles avec les matrices d'immittance seront développés dans le chapitre 7 consacrés au rendu haptique et à l'étude de la stabilité d'interaction. Quelques résultats pratiques supplémentaires sont présentés à la

section A.1.1.2.

Le temps de convergence, la robustesse au bruit et la transparence sont des facteurs critiques qui nécessitent d'être étudiés lors de l'ajustement des paramètres du régulateur d'un mécanisme haptique avec une méthode comme celle de l'ES-Tuning. Une fonction de coût est utilisée comme un paramètre pour définir la transparence dynamique (*i.e.* la diminution de l'effet de la réponse transitoire). Aussi, quelques solutions sont envisagées pour réduire l'effet du bruit sur le calcul du gradient de la fonction de coût. L'algorithme d'optimisation amélioré pour les rendus haptiques articulaire et cartésien inclut :

- une fonction de coût conçue pour décrire la transparence dynamique d'un enrouleur ou de un degré de liberté cartésien ;
- un filtre d'entrée ajouté comme un paramètre à optimiser ;
- un facteur de normalisation η qui multiplie le filtre passe-haut de l'algorithme ;
- un filtre passe-bas (appliqué après la démodulation) qui est ajusté en fonction de la valeur actuelle de la fonction de coût pour ajuster le temps d'intégration et
- des entrées dans l'espace logarithmique pour améliorer la robustesse.

Une recommandation supplémentaire, dans la mise en oeuvre pratique de cette approche, est d'appliquer un filtre passe-bas avec l'équation (4.21) sur la fonction de coût. Ce signal filtré doit être ensuite moyenné sur quelques essais avant chaque itération d'optimisation. L'algorithme actuel exécute cinq réponses transitoires pour lesquelles la moyenne de la fonction de coût est calculée.

Le modèle de l'enrouleur développé dans ce chapitre n'est cependant pas suffisant pour atteindre une commande adéquate de la tension dans les câbles. Le modèle actuel sert à l'étude des paramètres de l'algorithme de recherche d'extrémum et à l'amélioration de ses performances. Le prochain chapitre propose donc la suite de l'étude de la commande de la tension par le développement d'un meilleur modèle de l'enrouleur. Ce nouveau modèle inclut différents algorithmes de compensation pour la friction, la courbure des câbles et l'inertie articulaire.

Chapitre 5

Analyse de la transparence pour le rendu d'impédance

Une interface de locomotion entraînée à l'aide de câbles fournit un dispositif haptique avec peu d'inertie et permet à un utilisateur de marcher librement et d'interagir avec des objets dans un environnement virtuel. Les surfaces virtuelles génèrent des torseurs cartésiens qui doivent être maintenus par les enrouleurs dans le but de reproduire une sensation haptique aux deux pieds. L'utilisation d'une stratégie d'asservissement de la tension dans les câbles nécessite une mesure adéquate de ces tensions appliquées à la plate-forme. Cette dernière mesure peut être imprécise dans le cas où les capteurs sont situés à l'intérieur de l'enrouleur. De plus, l'hystérésis de la friction provenant des pièces mécaniques en mouvement doit être compensée surtout lors d'une faible vitesse d'enroulement. Finalement, la pose de la plate-forme n'est pas connue précisément dû aux déformations mécaniques et au fléchissement des câbles. Ce chapitre présente les caractéristiques d'un enrouleur réel avec la stratégie d'asservissement correspondante qui vise à surmonter les problèmes susmentionnés.

5.1 Introduction

Un mécanisme entraîné par des câbles pourrait être considéré comme un mécanisme d'impédance puisqu'un mouvement libre dans l'espace peut être rendu avec une commande en impédance ou plus particulièrement une commande en torseur inertiel nul si un capteur d'effort est intégré à l'effecteur. Cette commande est rendue possible grâce à des enrouleurs qui sont commandés pour maintenir leur tension dans les câbles et à un calcul d'efforts pour réduire l'inertie et le poids de l'effecteur. Chaque actionneur, pour maintenir cette tension (aussi appelé *l'enrouleur motorisé*), est composé d'un moteur DC faible coût avec une quadrature basse résolution pour la mesure de la position, une jauge de contrainte et une bobine. Ce type d'enrouleur permet d'effectuer un asservissement en position, en vitesse et en tension au niveau articulaire.

Pour ce type d'application, l'enrouleur doit être complètement transparent à l'utilisateur. En effet, au niveau de l'asservissement articulaire, l'inertie, la friction, la réponse non-linéaire de la jauge de contrainte, la précision du système d'acquisition et le comportement réel d'un câble (tel que l'élasticité et le fléchissement due à son poids) peuvent réduire la capacité du mécanisme à reproduire le torseur cartésien lors du rendu haptique. Ces caractéristiques intrinsèques provenant de la conception de l'enrouleur diminuent donc la capacité à reproduire une commande en impédance [129]. La transparence de l'enrouleur est définie comme l'habilité à reproduire un vecteur de tension qui garantit l'équilibre de la plate-forme peu importe la dynamique de l'enrouleur et qui permet la reproduction d'une grande bande passante d'impédance (*Z-width* [142]). Ce travail ne présente pas les effets du rendu haptique sur la transparence, la stabilité et la robustesse aux variations des paramètres tels que présentés dans [148] et [149].

Hannaford utilise les mécanismes entraînés par des câbles lors de l'analyse de la stabilité d'une interaction haptique [150]. D'autres applications incluent le pincement des doigts pour prendre des objets virtuels [151] et le toucher [152]. Les mécanismes entraînés par des câbles ont une rigidité structurelle et une dynamique relativement faible ce qui limite les simulations de contacts rigides. D'ailleurs, le calcul de la rigidité structurelle est présenté dans [67]. La conclusion est qu'il n'est pas possible de commander un rendu de texture et que seul le retour d'effort est envisageable. Pour le rendu de la texture, qui est en soit un rendu haptique, il faut utiliser des mécanismes qui ont une réponse en fréquence très élevée comme les piézo-électriques [153]. Il est cependant

possible de générer des vibrations dans les câbles qui, ponctuellement, génèrent une vibration suffisante pour simuler un impact avec un objet virtuel rigide lorsque la vitesse initiale est élevée. Il faut alors asservir les vibrations cartésiennes pour que l'équilibrage statique demeure fonctionnel.

L'asservissement de la tension est un défi puisque la somme vectorielle de toutes les tensions de chaque enrouleur appliquée sur la plate-forme doit équilibrer le torseur cartésien généré par la physique de l'environnement virtuel tout en considérant le comportement réel d'un câble, la friction, l'inertie et d'autres non-linéarités. Plusieurs propriétés des câbles appliquées aux mécanismes parallèles sont présentées dans [154] pour décrire l'effet du fléchissement géométrique d'un câble pour un asservissement en position statique d'un télescope géant.

D'autres concepts d'enrouleurs sont présentés dans [155] pour la mesure des tensions, cependant l'asservissement de ceux-ci pour une application haptique n'est pas présenté. En fait, dans plusieurs applications, il est possible de négliger les effets non-idéaux des enrouleurs et des câbles comme dans les travaux de [156]. Cependant, dans une application à grande échelle où l'humain est placé sur un mécanisme, comme une interface de locomotion [33], et où ce mécanisme doit reproduire une grande largeur de bande d'impédance et doit avoir une réponse fréquentielle adéquate pour reproduire des mouvements de la locomotion, la transparence de chaque composante doit être étudiée et compensée dans le but d'améliorer la réponse de la boucle de rétroaction.

Un enrouleur motorisé peut être considéré comme un instrument de musique à corde. La vibration des câbles peut, en plus de déstabiliser un rendu haptique, amplifier et renforcer les effets indésirables de la réponse d'un PID standard, soit le dépassement de la consigne et les oscillations naturelles à une certaine fréquence naturelle. En général, ce phénomène se produit lors d'un actionnement à haute vitesse ou lorsque la tension du câble varie rapidement se traduisant par une discontinuité dans la commande. L'analyse de la vibration est présentée dans [157] et deux servocontrôleurs pour réduire cette vibration dans le cas d'un câble élastique sont développés dans [140] et [158]. Aussi, la dynamique de l'interférence d'un câble sera négligée dans les travaux actuels.

La section 5.3 présente le comportement statique d'un câble tel que le fléchissement. Deux critères de performance lors de l'asservissement articulaire en tension sont définis afin de veiller à ce que l'effet de la gravité sur les câbles peut être négligé. La

section 5.4 présente les critères de conception pour analyser la friction produite par les composantes en mouvement, soit par la définition de la transparence statique de l'enrouleur. Finalement, la dernière section présente la stratégie de commande résultante avec quelques résultats supplémentaires provenant d'une analyse avec l'ES-Tuning.

5.2 Conception mécanique des enrouleurs

Chaque asservissement de tension d'un câble, faisant partie de la première couche entre le matériel et l'ensemble de l'algorithme du rendu haptique, doit permettre la mesure précise de la tension dans un câble de même que la longueur réelle du câble déployé. Plusieurs paramètres doivent donc être modélisés (au moins partiellement), tels que ceux-ci :

- l'effet de la gravité sur chaque câble, de même que la rigidité radiale et axiale, qui non seulement influenceront la force directement appliquée sur la plate-forme haptique, mais aussi influenceront la mesure de la longueur du câble provenant de la lecture de l'encodeur en quadrature de l'arbre du moteur ;
- le déplacement latéral du point de contact du câble sur le tambour d'enroulement qui se déplace lors de l'enroulement ou du déroulement en raison de la poulie qui se déplace sur une vis avec un certain pas (*thread pitch*) ;
- toutes les précompensations résiduelles des forces de friction statique entre le câble déployé et la jauge de contrainte, habituellement causées par la présence de pièces mécaniques qui agissent comme un point de contrainte statique sur le câble : ces forces ne peuvent pas être directement mesurées par la jauge comme si elles étaient invisibles et
- le déplacement de la force au point de contact entre le câble et la jauge de contrainte qui change la courbe de réponse du pont de Wheatstone en fonction de la force normale appliquée sur ce capteur.

Plusieurs de ces effets peuvent être minimisés au détriment des autres selon la conception choisie de l'enrouleur. Par exemple, il est possible d'éliminer les forces de friction en éliminant l'oeillet de l'enrouleur (le point de contrainte statique) bien que ce choix limite la couverture de l'angle de déploiement du câble.¹ D'un autre point

1. Une solution possible serait d'employer une oeillet rotatif.

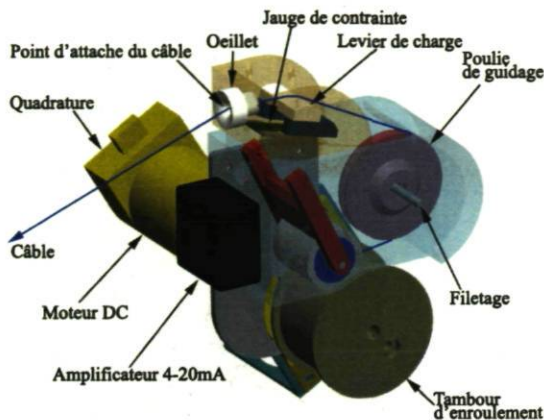


Figure 5.1: Conception mécanique de l'enrouleur

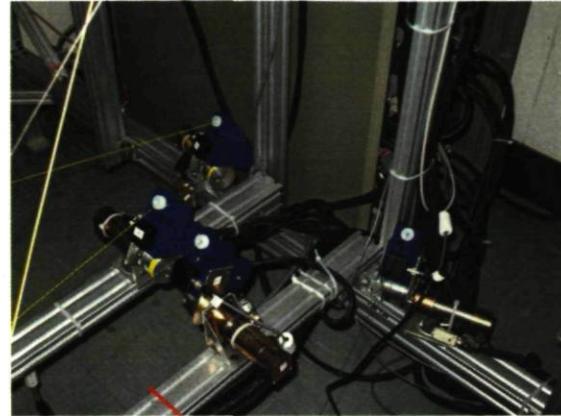


Figure 5.2: Un groupe de quatre enrouleurs qui asservisse la tension et la position des câbles

de vue, il serait préférable d'installer les capteurs sur la plate-forme mobile. Le coût de ce choix sera la difficulté de la compensation inertielle et de poids de la plateforme en ajoutant un système de transmission sans fil en plus de l'augmentation du coût de fabrication et de conception. Dans le but de réduire les coûts du système d'acquisition et d'instrumentation et de sa complexité d'implémentation et du plan de test selon les normes en vigueur, il est proposé d'utiliser une jauge de contrainte montée à l'intérieur de l'enrouleur avec un amplificateur 4-20mA qui inclut le filtrage du signal et de la mise à la terre tel que montré à la figure 5.1. Un groupe de quatre enrouleurs, sur un total de quatre groupes, qui est utilisé sur le prototype final, est présenté à la figure 5.2. D'autres concepts d'enrouleur ont été proposés comme dans [130], [159], [160] et [25], cependant, tous les concepts ont leur désavantage propre.

5.3 Comportement et physique d'un câble

Le comportement d'un câble affecte directement les performances d'une boucle de rétroaction. Dans l'objectif d'évaluer correctement l'incidence des propriétés d'un câble sur la régulation de la tension, deux critères de performances sont définis de manière à ce que l'effet de la gravité puisse être négligée : le *ratio de la différence de tension relative* (présenté dans la section 5.3.2) qui limite la variation maximum de la tension entre celle produite à l'enrouleur et celle induite au point d'attache de la plate-forme

(paramètre exprimé par β) et la *déviati on maximale en position* (présentée à la section 5.3.3) qui représente le pire des cas du fléchissement (de la courbure) du câble acceptable (paramètre exprimé par ϵ). Finalement, une partie de la dynamique du câble est présentée à la section 5.4.3 dans l'objectif de déterminer son effet sur la méthode d'optimisation de l'ES-Tuning. Avant d'aborder ces deux paramètres, la section suivante présente l'effet de l'élasticité du câble.

5.3.1 Élasticité du câble

Dans plusieurs applications, l'élasticité du câble doit être un paramètre à intégrer dans un modèle afin d'obtenir des simulations précises puisqu'il influence directement le calcul de la pose de la plate-forme. Ceci introduit une dépendance entre la position articulaire de l'arbre du moteur, la longueur du câble déployé et la tension effective dans le câble. Ce type de dépendance ne peut pas être directement mesuré et pourrait induire des comportements qui doivent être corrigés par le servocontrôleur s'il est nécessaire d'évaluer la vitesse et l'accélération. L'élongation du câble peut donc être décrite par l'équation (5.1) :

$$\Delta L = \frac{L_o \tau}{EA} \quad (5.1)$$

$$\Delta s = L_o + \Delta L \quad (5.2)$$

où ΔL est l'élongation du câble, L_o est la longueur initiale du câble, τ est la tension mesurée à l'enrouleur, E est le module de Young et A est l'aire de la section du câble. La longueur du câble réel Δs peut être calculée avec (5.2), assumant un fléchissement (courbure) de câble négligeable. La section suivante présente la tension minimale à appliquer pour négliger ce fléchissement et assurer que l'équation (5.2) est valide en tout temps.

5.3.2 Ratio de la différence de tension relative

La tension minimale à appliquer sur un câble $|T_1|$ doit assurer que le segment de droite entre l'oeillet de l'enrouleur et le point d'attache sur l'enrouleur demeure le plus droit possible. Dans l'étude des interférences entre les câbles, ce sujet sera important puisqu'il est nécessaire de connaître le point de rencontre entre les deux câbles tout en éliminant le temps de calcul nécessaire à la modélisation d'une interférence avec un fléchissement dans les quatre sections des câbles en interférence. Cette tension est calculée avec l'aide de la masse du câble, de son orientation approximative dans l'espace selon les deux points d'attache et une différence de tension relative $|\Delta T|$ entre la tension mesurée à l'enrouleur et la tension induite correspondante appliquée au point d'attache de la plate-forme. Comme résultat, un critère de performance nommée *ratio de la différence de tension relative*, et exprimé par β , peut être défini avec l'équation (5.3) :

$$\frac{|\Delta T|}{|T_1|} \leq \beta \quad (5.3)$$

$$|\Delta T| = |T_3 - T_1|$$

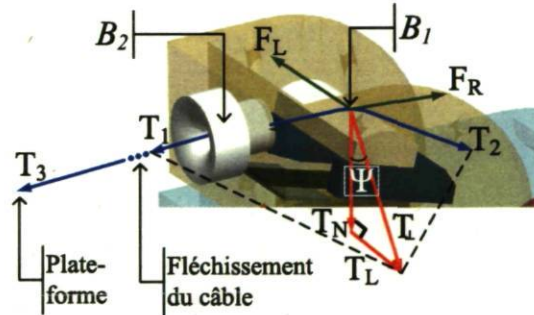


Figure 5.3: Définition des termes de tensions et de frictions

où T_1 est le vecteur de tension mesurée à l'enrouleur et T_3 est le vecteur de tension résultant correspondant appliqué au point d'attache de la plate-forme comme le montre la figure 5.3. Pour des considérations pratiques, il est possible de poser, par exemple, $\beta < 0,1$ comme une exigence pour obtenir une performance minimale. Concernant la différence de tension relative $|\Delta T|$, elle peut être calculée avec la longueur de câble réelle Δs de l'équation 5.2 mesurée avec la position articulaire compensée en élévation :

$$|\Delta \mathbf{T}| = \mu |\mathbf{g}| \Delta s \quad (5.4)$$

où μ est une constante approximative de la densité linéaire du câble et \mathbf{g} est le vecteur d'accélération de la gravité. Par conséquent, cette équation, dont les détails du développement mathématique sont donnés à l'annexe A.2 de l'article [161], indique que la tension minimale à appliquer sur un câble donné doit être proportionnelle à la longueur du câble de même que sa densité linéaire :

$$|\mathbf{T}_1| \geq \frac{\mu g \Delta s}{\beta}. \quad (5.5)$$

Pour un câble qui a un fléchissement faible, la densité linéaire est approximée par l'équation 5.6 :

$$\mu \approx \mu_0 \left(1 + \frac{|\mathbf{T}_1|}{EA} \right)^{-1} \quad (5.6)$$

où μ_0 est la densité linéaire lorsque $|\mathbf{T}_1| = 0$. L'algorithme d'optimisation de la tension dans les câbles doit évidemment considérer ce paramètre pour définir la contrainte de la tension minimale. D'un autre côté, la contrainte de tension maximale est associée à la force maximale que la jauge de contrainte peut lire dans sa plage linéaire et à la déformation mécanique maximale supportée par l'application.

5.3.3 Déviation maximale en position

La condition donnée par l'équation (5.5) fournit seulement une mesure indirecte du fléchissement du câble. Puisque la mesure de la position est importante pour déterminer la pose effective de la plate-forme, le fléchissement du câble mesuré par ϵ peut être relié par une autre condition de tension minimale comme celle décrite par l'équation 5.7 :

$$\tau_{sag} = \frac{\mu g (\Delta s)^2}{8\epsilon} + \frac{\mu g \epsilon}{2} \quad (5.7)$$

$$\iff$$

$$\epsilon \leq \frac{\Delta s}{2}$$

où ϵ est la déviation maximale en position, soit une mesure directe du fléchissement. Les détails du développement mathématique de cette équation sont présentés dans l'annexe A.4 de l'article [161], et correspond à un scénario approximatif du pire des cas provenant des équations générales décrivant le fléchissement exact prévu pour un câble infiniment rigide (élongation nulle) et avec une rigidité axiale très faible. Cette valeur de τ_{sag} doit correspondre à une déviation ϵ définie à l'intérieur du rayon du câble utilisé pour que ce critère devienne pertinent lors de l'évaluation de l'atteinte des performances. Dans la gestion des interférences, cette mesure est aussi importante pour corriger la position de croisement entre les câbles et déterminer le moment où une interférence pourrait se produire. Un autre paramètre sera défini pour déterminer approximativement un rayon maximum autour des câbles (exprimé par ϵ_e défini dans l'équation (6.8)) où il est probable qu'une interférence se produise. En effet, cette mesure sera utilisée dans un algorithme d'estimation du temps d'arrivée d'une interférence dans le but d'évaluer la commande à envoyer l'asservissement articulaire avant qu'une interférence se produise de manière à rendre celle-ci transparente à l'utilisateur.

5.4 Transparence de la commande en impédance

Il est possible d'améliorer davantage la compensation de friction en incluant les composantes dynamiques et statiques des forces de friction induites à l'oeillet. Ces forces de friction doivent être ajoutées à l'extérieur de la boucle de contre-réaction pour assurer son invisibilité sur la mesure du signal de la jauge de déformation. La détermination de ces forces doit être effectuée avec deux enrouleurs, soit par une méthode automatique qui détermine non seulement la courbe de calibrage d'un second enrouleur avec un premier enrouleur calibré, mais aussi qui assure la compensation des force de frictions en déterminant les coefficients de Coulomb pour les frictions dynamique et statique à l'oeillet. Cette méthode suppose donc l'utilisation d'un câble identique et d'un matériel identique pour chaque enrouleur. Les détails mathématiques associés à la détermination

pratique et théorique des coefficients sont présentés dans [7]. Dans cet article, le modèle de friction est présenté pour corriger la courbe de calibrage. Ensuite, ce modèle est utilisé pour définir un indice de performance sur la transparence statique de l'enrouleur. Cet indice de performance, qui définit la transparence statique de l'enrouleur, est le principal sujet de cette section. Le second sujet, présenté à la section 5.4.3, traite de la dynamique du câble soumis à une perturbation en ce qui concerne la transparence dynamique.

5.4.1 Hystérésis aux oeillets de deux enrouleurs

La mesure de l'hystérésis entre deux enrouleurs est importante pour connaître les variations de tension appliquée sur la plate-forme. L'expérimentation consiste à disposer deux enrouleurs calibrés face-à-face et d'augmenter l'angle entre le câble et la poulie de guidage. Le premier enrouleur impose une tension dans le câble qui est mesurée par le second enrouleur. La première expérimentation consiste à enlever les deux oeillets et prendre les mesures nécessaires pour déterminer l'hystérésis. Cette configuration correspond à une mesure lorsque l'angle entre le câble et la poulie de guidage est de zéro degré. Puisque le câble n'est pratiquement jamais à zéro degré malgré la géométrie du mécanisme, cette expérimentation doit être reprise avec l'angle maximum que la plate-forme peut reproduire dans son espace de travail. Cette dernière expérimentation doit être effectuée avec les deux oeillets pour déterminer l'hystérésis maximum.

Les forces de friction dues à l'hystérésis entre deux enrouleurs devraient être très faibles et cette courbe a une conséquence directe et non mesurable sur la performance de l'enrouleur et de la transparence du mécanisme. L'hystérésis due à la friction se produit entre deux enrouleurs lorsque l'angle du câble augmente même en utilisant des matériaux avec de faibles coefficients de friction. Ce résultat ne peut pas être compensé par le servocontrôleur puisque la variabilité de cette hystérésis est trop importante. L'hystérésis résultante, présentée à la figure 5.4, génère une force $|F_R|$, présentée dans la figure 5.3, dans le sens opposé de la direction du déplacement. Normalement, la mesure de la tension dans les câbles devrait réduire ce problème mais le design mécanique ne le permet pas. Ce design de l'enrouleur doit être amélioré afin d'utiliser tous les avantages de la commande de la tension dans les câbles afin de fournir un rendu haptique d'impédance cartésienne performant.

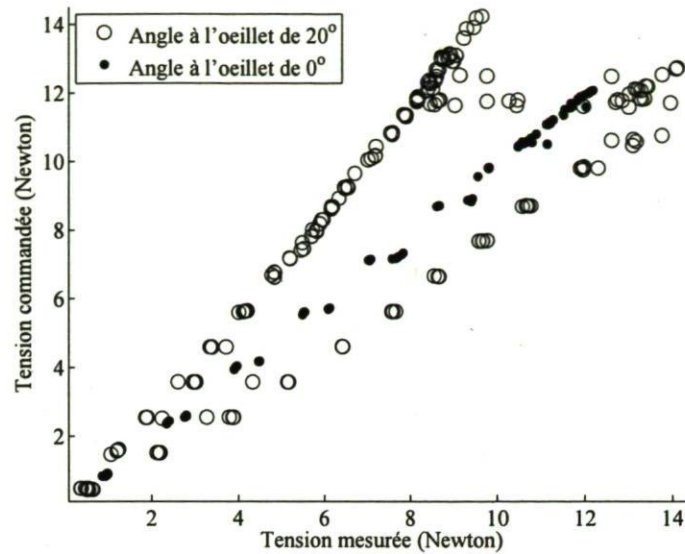


Figure 5.4: Courbe d'hystérésis dans la mesure de la tension dans un câble

5.4.2 Détermination du ratio d'atténuation

La valeur de l'atténuation de la tension dans le câble entre la force appliquée après la jauge de déformation et la force réelle après l'oeillet, notée B , peut varier en fonction de la tension appliquée pour plusieurs raisons, parmi lesquelles :

- le fait que ce n'est pas nécessairement la mesure exacte de la plus haute valeur due à l'hystérésis de la friction statique et
- la possibilité que le coefficient de la friction statique augmente avec le temps d'adhérence entre les deux surfaces impliquées [162].

Deux enrouleurs, nommés X et Y , sont positionnés face à face avec, par hypothèse, des coefficients de friction, et par conséquent un B respectif, très semblables. Les deux enrouleurs doivent avoir une commande optimale et sous-optimale en position et en force respectivement pour obtenir les résultats adéquats. Aussi, pour assurer un maximum de précision, chaque asservissement en position doit être ajusté de manière à diminuer le dépassement maximum, puisque ce paramètre pourrait occasionner des erreurs dues à l'hystérésis de la friction statique.

L'enrouleur X génère N consignes x_1 et le second enrouleur mesure y_1 avec la jauge de déformation ce qui donne B_i pour chaque consigne comme le montre la figure 5.5. La définition d'un paramètre de performance provient de la nécessité d'asservir exactement la même tension dans chacun des enrouleurs peut importe la friction. Ainsi, le calcul de la moyenne logarithmique de $\bar{\chi}$ et la déviation standard logarithmique de $\sigma(\ln B_i)$ fournit une évaluation intéressante de la performance de l'enrouleur puisqu'il est possible de réaliser cette expérimentation dans le procédé de fabrication. De plus, les étapes de conception d'un prototype devraient inclure la minimisation du critère défini par l'équation (5.8) :

$$\min \quad \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\chi - \bar{\chi})^2}{N}}, \text{ avec} \quad (5.8)$$

$$\chi = (\ln B_i), \quad (5.9)$$

où $\bar{\chi}$ est la moyenne arithmétique de χ . Dans le cas de la transparence statique de l'enrouleur, il est possible de définir un critère provenant d'un théorème de la psychophysique mise en évidence par la loi de *Weber-Fechner* [163]. Ce théorème définit le seuil différentiel² comme une limite en dessous de laquelle un individu ne parvient plus à différencier deux stimulations d'intensité différentes. La généralisation de la loi porte le nom de la *loi de puissance* ou la *loi de Stevens*. Cette dernière cherche à décrire la relation entre la grandeur physique d'un stimulus et l'intensité de la perception. L'idée est que la fraction de Weber $\Delta I/I = |\mathbf{F}_R|/|\mathbf{T}_2| = k$ soit constante et inférieure à 10% selon l'équation (5.10) :

$$\frac{|\mathbf{F}_R|}{|\mathbf{T}_2|} = C_R \sqrt{1 + B(1 + 2 \cos \gamma)} < 0,1 \quad (5.10)$$

Ce critère suggère que le ratio d'atténuation B est une mesure directe de la transparence statique et que B devrait toujours être supérieur à 0,9, soit 90%. Ce résultat montre que la performance de l'enrouleur diminue significativement avec une augmentation de la consigne en tension comme le montre la figure 5.5. Aussi, il est conservateur puisque les effets liés au contexte (par exemple : la motivation, l'éveil mental, la concentration sur ce stimulus particulier, etc.) ne sont pas considérés.

2. en anglais : Just Noticeable Difference (JND) ou differential limen (DL)

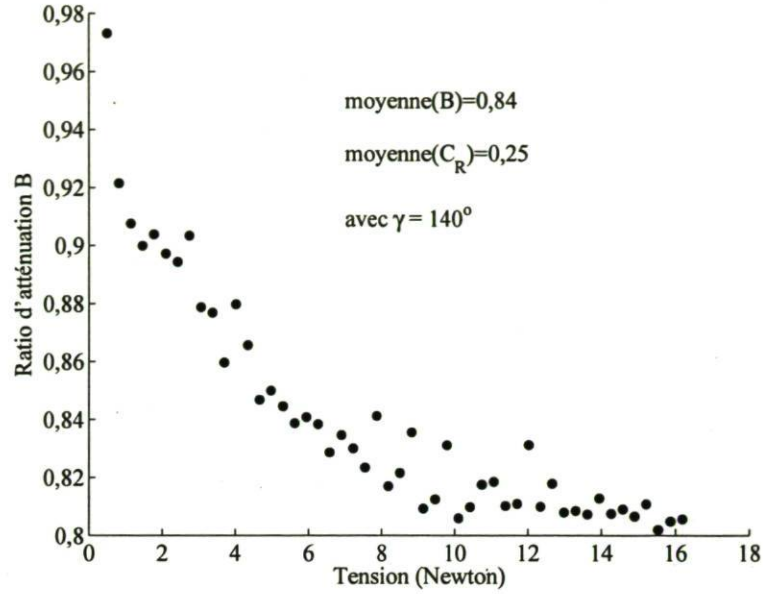


Figure 5.5: Ratio d'atténuation B en fonction des consignes en tension

Finalement, l'équation (5.10) doit être considérée dans la conception de la géométrie du mécanisme entraîné par des câbles. En effet, la friction articulaire affecte directement la commande en impédance cartésienne. Lors de la conception de la géométrie, il faut diminuer l'effet de la friction sur les DDL cartésiens en positionnant adéquatement les enrouleurs. Dans l'article de Perreault [33], il serait intéressant d'ajouter ce critère dans l'algorithme d'optimisation de la géométrie du mécanisme.

5.4.3 Dynamique du câble et effet sur l'ES-Tuning

La fonction de transfert d'un enrouleur peut être comparée à un instrument de musique à corde où la fréquence naturelle f_n est déterminée par la tension et la longueur du câble selon l'équation (5.11) pour un câble infiniment flexible [164] :

$$f_n = \frac{n}{2\Delta s} \sqrt{\frac{|T_1|}{\mu}} \quad (5.11)$$

où Δs est la longueur du câble, $|T_1|$ est la tension dans le câble à l'extérieur de l'enrou-

leur (après l'oeillet) et μ est la densité linéaire du câble approximatif. Dans le cas d'un violon, la friction de l'archet est utilisée pour exciter chacun des câbles. D'un autre côté, dans le cas d'un enrouleur, il est nécessaire de réduire cette friction pour éviter les vibrations induites dans les câbles.

L'analyse suivante considère un facteur d'approximativement deux (dans les conditions d'utilisation du mécanisme) pour les longueurs du câble Δs et la racine de la tension $\sqrt{|T_1|}$ qui déterminent expérimentalement l'influence de ces deux paramètres sur la fonction de transfert. Morizono a travaillé sur ce modèle pour l'asservissement d'un simulateur de jeux de tennis [160]. La largeur de bande en boucle fermée est aussi présentée pour un DDL avec deux enrouleurs. Cette section montre cependant quelques différences par rapport aux résultats présentés dans les travaux de Morizono précédemment cités.

Les figures 5.6, 5.7 et 5.8 montrent les largeurs de bande pratiques en fonction de la longueur du câble et de la tension de manière à ce que la structure du mécanisme n'entre pas en interférence avec la réponse de l'enrouleur. Ces résultats démontrent que les enrouleurs ne répondent pas exactement comme l'équation (5.11) et que la bande passante minimale ne rencontre pas celle que l'humain peut atteindre lors des mouvements des muscles. Aussi, dans le cadre de cette application, la variation de la tension n'est pas assez significative pour être considérée dans l'asservissement, contrairement à ce qui est démontré dans [160]. Cependant, la longueur du câble a une influence proportionnelle sur l'amortissement qui pourra être considérée comme un paramètre sur l'ajustement du servocontrôleur.

Ces courbes de réponse en fréquence ne montrent pas seulement la fréquence de résonnance principale proche de la fréquence de coupure due à la structure de l'enrouleur mais aussi une fréquence proche de celle de Nyquist-Shannon (316 Hz), qui est expliquée par la vibration découplée de la jauge de contrainte. La version améliorée de l'ES-Tuning est appliquée pour différentes longueurs de câble dans l'objectif de déterminer une solution locale optimale. La figure 5.9 montre l'évolution de la fonction de coût pour l'optimisation du PIDF pour les mêmes longueurs de câble décrit dans la figure 5.6. La convergence de l'ES-Tuning est donc effectivement influencée par la longueur du câble.

La figure 5.10 démontre clairement que le coefficient de l'intégrateur diminue en

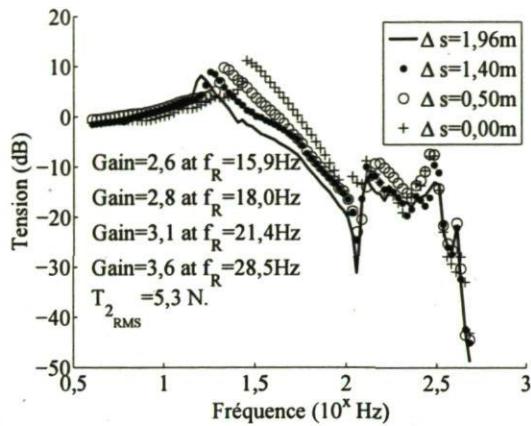


Figure 5.6: Réponse en fréquence de l'enrouleur pour une tension constante

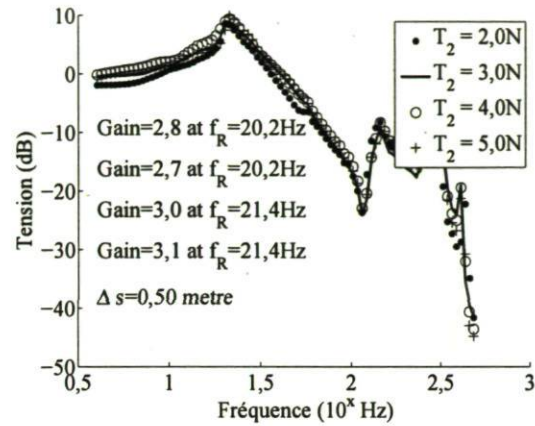


Figure 5.7: Réponse en fréquence de l'enrouleur avec une longueur de câble constante (0,5 mètre)

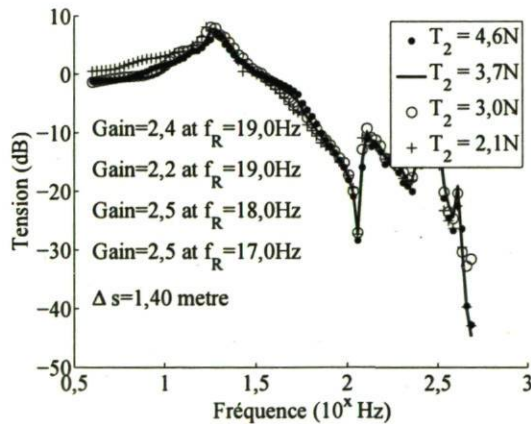


Figure 5.8: Réponse en fréquence de l'enrouleur avec une longueur de câble constante (1,4 mètre)

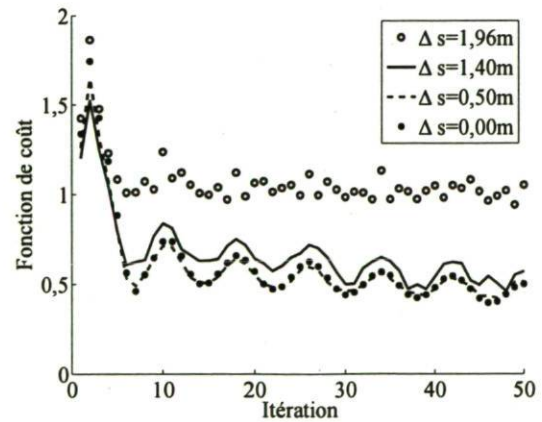


Figure 5.9: Évolution de la fonction de coût pour différentes longueurs de câble

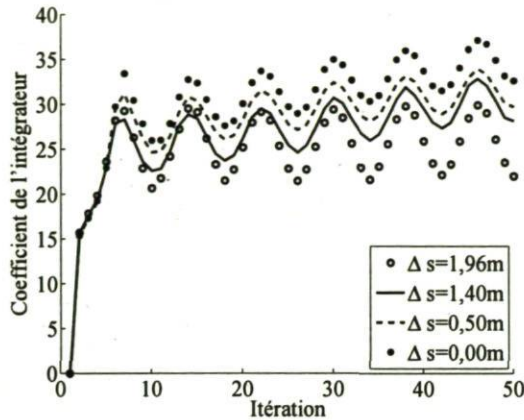


Figure 5.10: Évolution du coefficient de l'intégrateur du PIDF articulaire

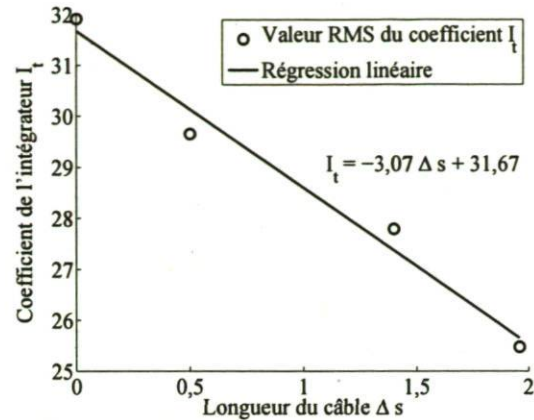


Figure 5.11: Coefficient de l'intégrateur du PIDF en fonction de la longueur du câble

fonction de la longueur du câble pour une tension sinusoïdale nominale. La relation entre la longueur du câble et le coefficient de l'intégrateur est linéaire comme le montre la figure 5.11. Bien que seul le coefficient de l'intégrateur soit le terme qui est le plus influencé, les quatre termes du PIDF (sans aucune contrainte sur leurs valeurs) sont optimisés par l'algorithme.

5.5 Architecture de l'asservissement articulaire d'un enrouleur

La figure 5.13 montre l'architecture choisie pour les trois types de commandes usuelles (tension, position et vitesse). La commande en position est nécessaire dans le cas où la plate-forme quitte son espace de travail soit lorsque l'algorithme de la distribution optimale des tensions dans les câbles ne trouve aucune solution pour le torseur cartésien à équilibrer. La commande en position est utilisée, par exemple, pour amener l'utilisateur de la position de départ sur le socle des plates-formes jusqu'au centre de l'interface de locomotion où la commande pourra être changée en tension. La figure 5.12 montre le robot marcheur à sa position de départ sur le socle. La sélection du type de commande est réalisée automatiquement par la matrice S pour chaque moteur de la plate-forme. Cette matrice S dépend de l'espace de travail dynamique déterminé par

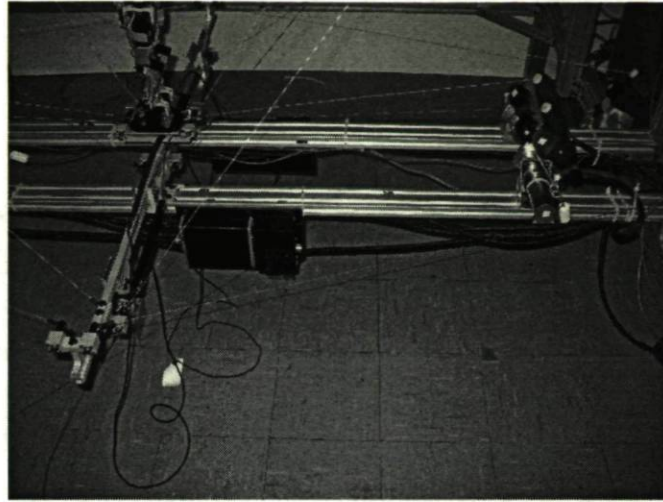


Figure 5.12: Position de départ du robot marcheur KHR-1HV sur le socle

l'algorithme de l'ODT et par les tensions dans les câbles.

Lors d'une manipulation de la matrice de sélection, il est important de conserver la même quantité d'énergie entre les deux types de commande (soit dans le PID lui-même, mais aussi dans les filtres) pour conserver une solution continue.

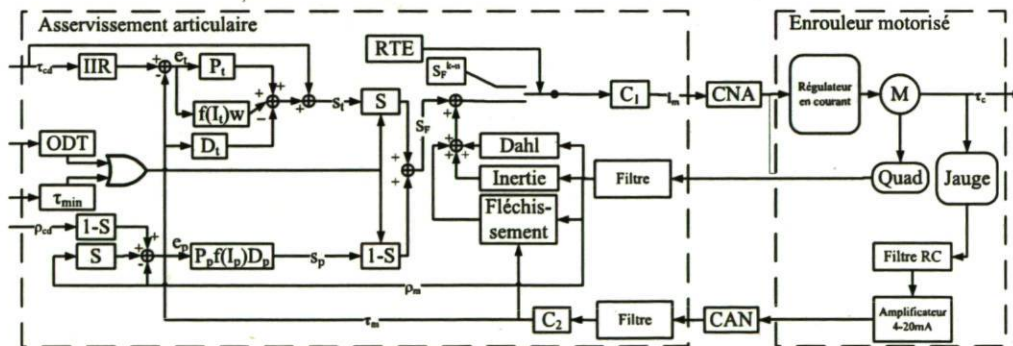


Figure 5.13: Architecture de l'asservissement articulaire d'un enrouleur

Ce type d'architecture permet de maintenir la plate-forme à la limite de l'espace de travail dynamique. À cette position, le capteur d'efforts peut être utilisé pour déplacer la plate-forme selon ce qui est décrit dans [165] bien qu'il ne soit pas possible de conserver un asservissement dans tous les DDL. La transition à la limite de l'espace de travail est accomplie en considérant la tension minimum τ_{min} dans le câble ou en considérant le torseur mesuré du capteur d'efforts pour éviter de demeurer collé à cette position.

Les termes de précompensation sont ajoutés à la sortie de la commande hybride, soit la compensation de friction avec un algorithme de Dahl (une version modifiée de LuGre), la compensation d'inertie de l'enrouleur et la compensation due au poids du câble. La compensation due au poids du câble est utile pour les mécanismes dont la taille est plus imposante que le prototype actuel. Aussi, les algorithmes de compensations de la friction sont très difficiles à calibrer et ne rendent souvent pas suffisamment bien le phénomène de l'hystérésis. D'ailleurs, il faut augmenter les paramètres du modèle lorsque les tensions sont élevées, ce qui rend la boucle de rétroaction instable lorsque le bruit sur la vitesse augmente. Finalement, la compensation d'inertie est souvent inexploitée considérant la difficulté d'obtenir l'accélération lors d'un mouvement à faible vitesse à partir d'un encodeur en quadrature avec une faible résolution. Habituellement, il est fort conseillé de critiquer un design qui inclut ces types de compensations sans l'utilisation des concepts de fusion de données ou l'utilisation de filtrage statistique basé sur le modèle physique du mouvement. Dans le cas d'une application haptique, le modèle physique du mouvement est généralement inconnu puisqu'il n'y a pas de trajectoire prédéterminée.

Les termes C_1 et C_2 sont les courbes de régression quadratique qui représentent respectivement la calibration de chaque axe des amplificateurs de puissance et des jauges de contrainte dans l'enrouleur. Ce calibrage doit être réalisée à l'aide d'un logiciel maison pour le système d'exploitation temps réel. Le calibrage de C_2 nécessite une manipulation particulière pour compenser l'effet de la friction entre le câble et le levier [7]; d'où la nécessité d'une courbe de régression quadratique. Quelques éléments de sécurité ont été implantés dans l'asservissement articulaire représentés par le bloc (*RTE*) qui permet d'utiliser une commande en boucle ouverte sur des valeurs qui sont considérées valides avant qu'une erreur se produise. Un clip vidéo est présenté à la section A.1.1.3 pour démontrer l'approche utilisée dans ce chapitre.

5.6 Conclusion

Ce chapitre propose quelques solutions de compensations du comportement non-linéaire d'un enrouleur. La précision de l'asservissement en tension articulaire est directement responsable de la qualité du rendu de la commande en impédance cartésienne lors d'un mouvement libre dans l'espace ou lors de la reproduction d'une surface vir-

tuelle faiblement rigide. Une variation de la tension dans un câble qui ne peut être mesurée produira un mouvement de la plate-forme dans l'espace et une perte de la transparence de celle-ci. Cette transparence est atteinte lorsque tous les enrouleurs sont en mesure de générer une réponse similaire tout en s'approchant d'un gain unitaire.

Les résultats présentés dans l'article [7] suggèrent que plusieurs paramètres doivent être optimisés lors de la conception d'un enrouleur utilisé dans des applications haptiques :

- augmenter la rigidité de la structure de l'enrouleur et de la structure qui maintient les enrouleurs pour éviter des instabilités dans la boucle de rétroaction ;
- augmenter la fréquence de réponse pour permettre de simuler des contacts rigides et permettre des déplacements en haute vitesse ;
- augmenter la précision dans la mesure de la vitesse angulaire en utilisant un tachymètre [166] ou une quadrature plus précise pour adéquatement compenser la friction et l'inertie ;
- diminuer l'hystérésis de la friction statique pour assurer une mesure précise de la tension dans un câble et éviter une augmentation inutile de la vibration du câble à faible vitesse causée par une friction sèche ;
- optimiser la boucle de rétroaction pour limiter les dépassements et pour réduire le temps de montée et
- réduire le bruit électronique dans tout le système incluant le système d'acquisition, les amplificateurs, etc.

La transparence doit être étudiée dans le cas statique (hystérésis, comportement des câbles, déformation mécanique, etc.) et dans le cas dynamique (réponse transitoire, erreur en régime permanent) puisque chaque enrouleur a des réponses différentes notables. Dans ce cas, la solution optimale n'est pas nécessairement la solution finale recherchée. En effet, il est préférable de trouver les paramètres de l'asservissement pour obtenir une réponse similaire entre tous les enrouleurs et trouver une géométrie du mécanisme qui réduit l'effet de la friction dans tous les DDL cartésiens.

De plus, ce chapitre introduit deux critères de performance (nommés *ratio de la différence de tension relative* et la *déviaton maximale en position*) afin de minimiser les comportements non idéaux des câbles et pour améliorer la précision de l'asservissement. En effet, la section 5.3 énumère les conditions qui doivent être rencontrées à l'égard d'un

câble possédant une masse non négligeable afin de réduire le fléchissement.

La procédure pour analyser la transparence haptique cartésienne inclut un capteur d'efforts 6DDL installé sur la plate-forme pour mesurer les torseurs résiduels appliqués par le servocontrôleur en tension lorsqu'une commande en impédance est sélectionnée avec une commande en torseur inertiel nul (la plate-forme est commandée pour se déplacer librement dans l'espace). Le capteur d'efforts est aussi utilisé dans la commande hybride en appliquant le plus haut gain possible (limité par la stabilité de la marge de gain et de phase) pour éliminer les erreurs résiduelles dues aux compensations articulaires et à la précision de la position des enrouleurs et des points d'attache des câbles sur la plate-forme.

Le chapitre 7 présente l'architecture de la commande hybride cartésienne qui permettra de compléter une interface de locomotion miniature fonctionnelle basé sur le mécanisme entraîné par des câbles. Avant tout, le contrôle et la gestion des interférences doivent être étudiés pour comprendre leurs effets sur l'asservissement articulaire. Le prochain chapitre présente donc les stratégies de gestion des interférences entre les câbles.

Chapitre 6

Détermination et gestion des interférences

L'interaction intrinsèque d'un mécanisme qui inclut deux plates-formes actionnées par des câbles tout en étant contraintes dans les 6DDL et partageant le même espace de travail pourrait occasionner des croisements entre ses câbles (nommé interférence des câbles) pour des trajectoires aléatoires. Ce chapitre présente et analyse les méthodes qui déterminent géométriquement et qui gèrent ces interférences pour toutes trajectoires contraintes avec une charge variable. Les algorithmes considérés déterminent quel câble peut être relâché d'un asservissement nominal, soit en permettant uniquement une commande avec une tension minimale, tout en veillant à ce que les deux plates-formes demeurent dans l'espace des poses polyvalentes. Le procédé de la gestion des interférences entre les câbles constitue un défi puisqu'il est nécessaire de considérer les limites inhérentes et les modifications de l'espace de travail, qui comprennent non seulement les possibilités d'interférence, mais aussi la géométrie du mécanisme, sa dynamique, les comportements non idéaux des câbles réels et l'exigence que les deux plates-formes doivent être complètement contraintes en tout temps.

6.1 Introduction

Une interface de locomotion entraînée par des câbles (ILEC) a été proposée comme une interface haptique qui peut être utilisée dans des applications comme la réadaptation, l'entraînement dans un environnement virtuel et le divertissement. Sa conception doit répondre à de nombreuses démarches incluant les virages à droite et à gauche, la montée de pentes ou d'escaliers, etc. [129]. Dû à la géométrie du mécanisme et aux trajectoires des pieds, des croisements entre les câbles peuvent se produire. Comme les interférences se produisent avec d'autres conditions de contrôle (comme les tensions maximale et minimale permises par l'asservissement articulaire) pour restreindre la dimension de l'espace de travail, différentes méthodes ont déjà été élaborées pour les analyser. Par exemple, Maeda et al. [167] présentent les équations de la cinématique pour calculer la position du point de contact du croisement de deux câbles, Merlet [168] développe un algorithme pour déterminer exactement quelle région de l'espace de travail est sans interférence et Ketchel et al. [169] présentent une approche pour détecter les collisions entre deux corps de formes cylindriques sans toutefois élaborer une tentative de gérer ces interférences. Plus récemment, Wischnitzer et al. [170] a étudié l'espace de travail et les singularités d'une interférence entre deux câbles en collision sans toutefois gérer dynamiquement le début et la fin d'une interférence en temps réel.

Un câble peut être *relâché* d'un état actif d'actionnement pour qu'il puisse glisser librement, sans trop générer de friction au point de contact, sur l'autre câble (nommé le *câble support*) pendant une interférence. Le câble relâché est donc commandé *passivement* a une valeur de tension minimale de manière à réduire le fléchissement du câble causé par la gravité. Comme résultat, les plates-formes sont actionnées par les câbles libres et par les câbles supports uniquement, puisque les câbles relâchés agissent passivement sur le système. Étant donné que chaque plate-forme est asservie en retour d'efforts (asservissement en forces et en moments), seules les tensions dans les câbles sont commandées directement (il n'y a pas de commande en position). En d'autres mots, la position de la plate-forme est une conséquence d'une commande des tensions dans les câbles et les positions articulaires ou cartésiennes ne sont pas commandées comme telles. En ce qui concerne la position cartésienne, elle est commandée lorsqu'il est nécessaire de reproduire une surface extrêmement rigide lors d'une application haptique. Le calcul de la tension requise dans chaque câble est réalisé par un algorithme d'optimisation de la distribution des tensions (ODT) qui distribue le torseur appliqué

(la charge) sur une plate-forme, selon ce qui est proposé dans [130] et [131]. Cet algorithme d'ODT peut générer des discontinuités dans les autres câbles puisque le fait de relâcher l'actionnement d'un câble peut se traduire par une modification soudaine de la géométrie du mécanisme.

Les applications typiques des mécanismes actionnés avec des câbles contraints dans les 6 DDL n'utilisent habituellement qu'une seule plate-forme qui opère dans un espace de travail donné. À notre connaissance, aucune étude n'a été menée concernant la détection et la gestion des interférences entre les câbles de deux plates-formes indépendantes contraintes dans les six DDL partageant le même espace de travail tout en considérant le comportement réel d'un câble et l'élimination de la discontinuité des tensions. Par conséquent, ce chapitre présente une approche pour gérer les interférences entre les câbles de deux plates-formes partageant une partie du même espace de travail. L'approche peut être résumée par l'action de prédire une interférence pour ajuster les contraintes sur les tensions dans le but de réduire les discontinuités tout en validant que les deux plates-formes demeurent à l'intérieur de l'espace de travail si un câble est relâché. Finalement, le câble sera relâché de son état d'actionnement actif quand l'interférence entre les deux câbles sera détectée, permettant ainsi aux plates-formes de continuer librement sur leurs trajectoires [161, 171].

La première section de ce chapitre présente l'algorithme de la gestion des interférences entre les câbles qui définit les conditions de relâchement d'un câble à la fin et au début d'une interférence. Puisque la réduction brusque de la tension du câble relâché peut entraîner des discontinuités de tension dans tous les câbles, ce chapitre propose aussi un système d'équations pour la prédiction (l'estimation sans modèle)¹ des collisions qui peut être appliqué sur les mécanismes avec des actionneurs redondants afin de réduire de telles discontinuités. La deuxième section de ce chapitre présente donc une méthode pour réduire ou éliminer les discontinuités des tensions dans les câbles. Cette méthode calcule l'intersection de deux hyperplans (dans l'espace-temps euclidien) représentant la trajectoire de chaque câble pouvant participer à une collision en utilisant les mesures connues des dérivées des trajectoires des plates-formes à un temps donné. Cette procédure permet de déterminer l'*Estimation du Temps d'Arrivée d'une Interférence* (ETAI noté mathématiquement par la variable $\tilde{\delta}_e$) qui à son tour peut être utilisé pour réduire les discontinuités des tensions. Puisque ces algorithmes sont inclus

1. Le terme prédiction n'est pas utilisé pour décrire une commande prédictive qui utilise un modèle, mais plutôt pour estimer un événement futur.

dans le projet d'une interface de locomotion, les utilisateurs ne doivent pas ressentir les effets d'une interférence, ce qui justifie cette méthode. Finalement, la dernière section présente quelques expérimentations lorsque les deux plates-formes sont dirigées par les pieds d'un utilisateur pour une marche lente et normale.

6.1.1 Espace de travail des plates-formes de l'interface de locomotion

La gestion des interférences entre les câbles nécessite la définition d'un espace de travail qui permet à l'algorithme d'optimisation de la distribution des tensions de déterminer des valeurs de tensions positives à l'intérieur d'une plage bornée par des valeurs minimales et maximales. La vérification de l'espace de travail est utilisée en temps-réel pour déterminer si la plate-forme, à un certain horizon de prédiction, est dans une pose contrôlable lorsque la géométrie du mécanisme est modifiée par le relâchement d'un câble. Il existe plusieurs définitions de l'espace de travail : le *wrench feasible workspace* (WFW) [172] et [173], l'espace atteignable statique [174] et l'espace commandable [175], parmi bien d'autres.

Une interférence altère la dimension de l'espace de travail aussitôt qu'un câble est relâché. Puisque les deux plates-formes doivent demeurer à l'intérieur des frontières de cet espace et qu'il y a un choix sur un des deux câbles à relâcher, la configuration de l'espace devient un critère de sélection pour déterminer quel câble doit être relâché. Il est aussi requis d'avoir une approche efficace en temps de calcul pour déterminer si la pose de la plate-forme est ou non dans l'espace de travail. Ferraresi et al.[176] et Gouttefarde et al.[177] ont tous les deux proposé une procédure de test qui résout le problème susmentionné tout en permettant des simplifications pour les cas de sept ou de huit câbles.

Ce chapitre utilise l'espace des poses polyvalentes (EPP) ² en combinaison avec l'espace de travail dynamique pour la gestion des interférences. L'EPP est défini comme l'ensemble des poses pour lesquelles tous les torseurs appliqués peuvent être équilibrés par des tensions positives. Cet espace est imposé par l'unilatéralité d'actionnement : si un câble doit pousser (tension négative) sur la plate-forme pour conserver son orien-

2. En anglais : *wrench-closure workspace* (WCW)

tation et sa position, alors la plate-forme est à l'extérieur de l'EPP. L'EPP dépend uniquement de la géométrie du mécanisme, et donc ne tient pas compte des contraintes sur les valeurs minimale et maximale admissibles de tensions et ne tient pas compte des interférences [178]. D'un autre côté, l'espace de travail dynamique dépend des accélérations de la plate-forme et inclut l'espace statique comme un cas particulier lorsque l'accélération de la plate-forme est nulle [179].

6.1.2 Optimisation de la distribution des tensions (ODT)

Puisque chaque plate-forme est actionnée avec l'aide de $n - 6$ câbles redondants, il est important que la tension soit distribuée entre eux selon les conditions cinématique et dynamique de manière à minimiser la puissance individuelle commandée à un actionneur [138, 130, 180]. Il est nécessaire de maintenir la valeur de la tension dans un câble sous un certain seuil minimum τ_{min} dans l'objectif de réduire le fléchissement. Un tel seuil doit être défini plus grand que la précision du système d'acquisition combiné avec un critère de performance obtenu dans le chapitre 7. Les actionneurs (*i.e.* l'enrouleur, le moteur, le câble et le capteur) sont aussi limités par une valeur de tension maximale τ_{max} qui permet d'éviter des problèmes d'asservissement. Par conséquent, la méthode d'ODT proposée par l'équation (6.1) permet la gestion des interférences, la réduction du fléchissement dans les câbles ainsi que la réduction des déformations mécaniques de l'enrouleur :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser} \quad \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{G} \boldsymbol{\tau} \\ \text{sous} \quad \left| \begin{array}{l} \mathbf{W} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{h}_c, \text{ avec} \\ \tau_{max} \geq \tau_i \geq \tau_{min} \\ \text{si interférence, } \tau_{max} \leftarrow \tau_{min} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (6.1)$$

$$\mathbf{G} = \text{diag}(g_i) \quad (6.2)$$

$$\mathbf{h}_c = G_{ch}(\mathbf{h}_r - \mathbf{h}_a) + \mathbf{h}_{wPF} + \mathbf{h}_{iPF} + \mathbf{h}_r \quad (6.3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & \dots & \tau_n \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & N_x & N_y & N_z \end{bmatrix}^T$$

$$i = 1, 2, \dots, n \text{ câbles,}$$

où \mathbf{h}_c représente les forces F_i et les moments N_i qui sont appliqués sur une seule plate-forme (i.e. le torseur appliqué par les câbles sur cette plate-forme), τ_i est le vecteur de tension du i ème (de n) câble, \mathbf{W} est la matrice du torseur pose-dépendante calculée avec les deux matrices Jacobiennes d'une plate-forme qui lient les vitesses cartésiennes aux vitesses articulaires, \mathbf{G} est une matrice de pondération diagonale tel que $g_i = 1 \forall i$, et G_{ch} est un filtre standard pour l'asservissement. Les détails mathématiques de l'équation (6.1) sont présentés dans [179] et une application est décrite dans [33].

Lorsqu'une interférence se produit, le câble relâché est maintenu par le servocontrôleur articulaire à une valeur minimale en posant $\tau_{max} \leftarrow \tau_{min}$. Cette équation est résolue pour τ en utilisant la programmation quadratique telle que décrite dans [181] ou [182]. Dans l'interface de locomotion, l'inertie et le poids de la plate-forme, des câbles et des capteurs doivent être compensés pour augmenter le réalisme du rendu haptique. Par conséquent, \mathbf{h}_c inclut non seulement la charge variable appliquée sur la plate-forme \mathbf{h}_a par le pied de l'utilisateur et l'ensemble des torseurs \mathbf{h}_r calculés à partir de l'interaction entre le pied et l'environnement virtuel, mais aussi l'effet du poids \mathbf{h}_{wPF} et de l'inertie \mathbf{h}_{iPF} de la plate-forme avec les capteurs. Dans le cas d'une commande en impédance avec un retour en force, un torseur additionnel \mathbf{h}_r est ajouté pour le rendu haptique d'un contact virtuel entre le modèle du pied virtuel et l'objet virtuel [183]. Quant à l'inertie des moteurs, des enrouleurs et des autres composantes articulaires, ils sont considérés par le servocontrôleur articulaire du chapitre 5 en vue d'accélérer les réponses de leur boucle de rétroaction.

Comme la formulation ci-dessus ne garantit pas la continuité des valeurs des tensions dans tous les câbles lorsqu'un câble est relâché de son état d'actionnement actif, la section 6.3 propose des solutions pour réduire ou même éliminer les discontinuités qui pourraient se produire sur une trajectoire aléatoire. Par conséquent, l'algorithme de l'ODT doit être amélioré, ce qui implique qu'il doit équilibrer le total des torseurs appliqués sur la plate-forme utilisant la continuité en tant que critère principal, et ne devrait donc pas chercher les valeurs optimales des tensions lorsqu'une interférence se produit. En d'autres termes, dans la gestion des interférences des câbles, la continuité de la solution est plus importante que la recherche d'une solution optimale. L'objectif est de réduire les risques du contrôle d'une discontinuité et pour assurer que l'équilibrage des tensions des câbles est toujours respecté pour conserver un rendu haptique performant.

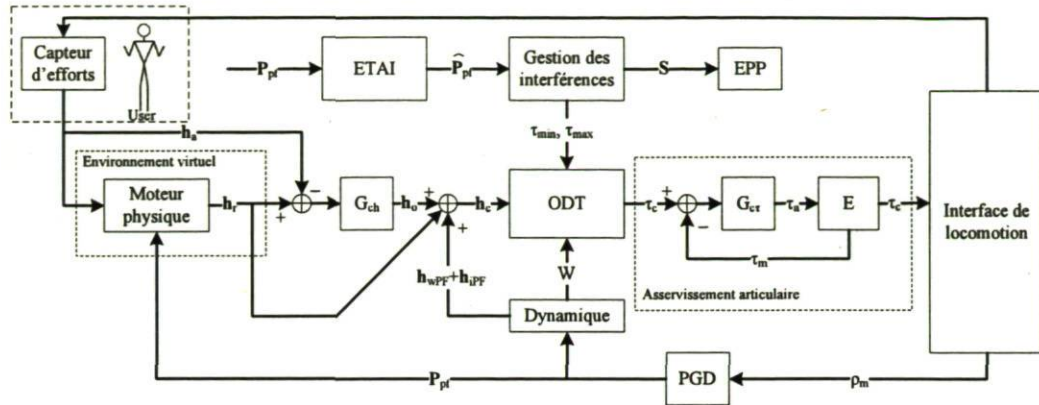


Figure 6.1: Processus de l'algorithme du servocontrôleur lors de la gestion des interférences

6.1.3 Stratégie de contrôle lors de la gestion des interférences

L'algorithme du servocontrôleur (inclus dans le gestionnaire de l'asservissement qui est présenté dans le chapitre 7) de l'interface de locomotion doit être maintenant amélioré par rapport à celui présenté au chapitre 3. En effet, les discontinuités qui peuvent se produire dans le procédé doivent être réduites ou même éliminées puisqu'elles génèrent des vibrations dans les câbles; un comportement indésirable dû, en partie, à la friction avant la jauge de contrainte et aux câbles qui ont tendance à vibrer à leur fréquence naturelle. Ce problème empêche ainsi une application exacte de l'algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions.

Sur la figure 6.1, la boîte EPP représente l'espace des poses polyvalentes évalué pour chaque pose estimée \hat{P}_{pfi} des plates-formes. L'EPP utilise le signal S qui représente l'état de chaque câble, *i.e.* soit les trois états suivants : câble relâché, support ou libre. Dans les simulations informatiques, ces états sont numérotés 0, 1 et 2 respectivement, comme le montrent, par exemple, les résultats des simulations de la figure 6.11 et 6.15. Finalement, la boîte ETAI offre un temps estimé \hat{t} de même qu'une pose estimée, pour un certain horizon de prédiction, de l'événement d'une interférence. Son utilité est de réduire ou d'éliminer les discontinuités en ajustant les contraintes définies dans l'algorithme de l'ODT. L'ETAI est prédictif par nature et considère le comportement non idéal des câbles (*i.e.* le fléchissement et le diamètre fini, parmi plusieurs autres).

6.2 Algorithme de la gestion des interférences entre les câbles

Le procédé de la gestion des interférences peut être implanté en utilisant différentes approches. Par exemple, il serait possible d'éviter les interférences en utilisant une planification de trajectoire et des algorithmes d'évitement de contact [184, 185]. Malheureusement, on ne peut pas garantir que les interférences peuvent être évitées pour des trajectoires aléatoires ou non planifiées. De plus, les algorithmes d'évitement tels que les algorithmes de rappel³ sont utiles lorsqu'il n'y a pas d'autres options pour conserver une trajectoire désirée. Une autre possibilité serait de permettre aux enrouleurs de se déplacer en les installant sur des chariots et des poulies [124]. Cependant, cette option augmente la complexité du système et élimine en partie la faible inertie des mécanismes entraînés avec des câbles (notamment en comparaison avec des mécanismes à barres obtenu avec un agencement de vérins sur des pivots) et affecte la précision du positionnement de l'enrouleur.

Dans ce contexte, ce chapitre ne cherche pas à éviter toutes les interférences, mais plutôt tente de les contrôler en permettant à certains câbles d'être relâchés d'un état actif d'actionnement et tente de contrôler le câble relâché à une valeur de tension minimale tout en conservant les plates-formes à l'intérieur des limites de l'espace de travail. Les sections suivantes détaillent la méthode de la détermination d'une interférence, *i.e.* la méthode qui choisit le câble à relâcher tout en réduisant les discontinuités. Plus précisément, la méthode détermine :

- quand et où une interférence débute et se termine ;
- quel câble doit être relâché ou doit devenir le câble support et
- comment réduire ou éliminer les discontinuités des valeurs de tensions considérant la masse non négligeable du câble et son élongation.

3. En anglais : *washout filter* [186]

6.2.1 Détermination géométrique des interférences

Les conditions des collisions liées à un point d'interférence peuvent adopter différentes formulations mathématiques comme celles décrites dans [167], [168] et [187]. Une de ces formulations est basée sur la distance minimale L_{md} ($\mathbf{P}_{c2} - \mathbf{P}_{c1}$ montrée dans la figure 6.2) entre tous les câbles qui peut être calculée de cette manière : le vecteur unitaire \mathbf{n}_{md} décrivant la distance minimale entre deux câbles est normal aux deux câbles, et peut être facilement obtenu en calculant le produit vectoriel des vecteurs unitaires \mathbf{n}_{c2} et \mathbf{n}_{c1} dans la direction de chaque câble, selon l'équation (6.4). La longueur du vecteur de la distance minimale est dérivée à partir des points d'attache du câble et d'un système d'équations linéaires décrit par (6.5) :

$$\mathbf{n}_{md} = \mathbf{n}_{c2} \times \mathbf{n}_{c1} \quad (6.4)$$

$$L_{c1}\mathbf{n}_{c1} + L_{md}\mathbf{n}_{md} - L_{c2}\mathbf{n}_{c2} = \mathbf{P}_{m2} - \mathbf{P}_{m1} \quad (6.5)$$

où L_{ci} est la distance entre le point d'attache du câble \mathbf{P}_{mi} du i ème câble et \mathbf{P}_{ci} est l'intersection avec un vecteur commun perpendiculaire $L_{md}\mathbf{n}_{md}$. Il est à noter que le système dans (6.5) inclut trois équations, une par dimension spatiale, ainsi que trois inconnues : L_{c1} , L_{c2} et L_{md} .

La détermination des interférences doit considérer quelques propriétés non idéales comme le fléchissement du câble, le diamètre fini, les déformations mécaniques de la structure et les incertitudes sur les points d'attache des câbles. Ces propriétés sont ainsi prises en compte dans les algorithmes à l'aide d'un rayon ϵ_e défini par (6.8). La stratégie employée est donc de relâcher un câble en prévision d'une interférence puisqu'il est presque impossible dans la pratique de déterminer les erreurs telles que les déformations mécaniques avec suffisamment de précision. Par conséquent, les conditions qui doivent être rencontrées au cours de la détection d'une interférence sont les suivantes :

- L_{md} change de signe entre deux temps de calcul, signifiant que la distance L_{md} a passé par zéro entre les deux (equation (6.6)) ;
- L_{c1} et L_{c2} ont des valeurs comprises entre 0 et la longueur totale du câble respectif, signifiant que le point d'interférence n'est pas situé sur l'extension virtuelle d'un câble (equation (6.7)) ;

- L_{md} est à l'intérieur d'un diamètre $\epsilon_e \geq \epsilon$ qui englobe le diamètre d'un câble ainsi que l'erreur de position, *i.e.* le fléchissement du câble, les déformations mécaniques, la précision du calibrage en position, etc. (equation (6.8))

$$L_{md}^{t-1} L_{md}^t \leq 0 \quad (6.6)$$

$$0 < L_{ci} < \|P_{pfi} - P_{mi}\| \quad (6.7)$$

$$\|L_{md}\| \leq \epsilon_e, \quad (6.8)$$

où P_{pfi} est le i ème point d'attache du câble sur la plate-forme. La situation où $\epsilon_e = \epsilon$ se produit, le fléchissement du câble est le seul facteur considéré puisque l'asservissement du mécanisme est défini comme étant parfait.

Lorsqu'une interférence entre deux câbles est détectée, un des deux câbles est relâché avant le point d'interférence cessant ainsi d'actionner activement la plate-forme et permettant au câble de glisser librement sur le second ; le second devenant le câble support (voir la figure 6.2). Il est intéressant de noter que la condition $L_{md}^{t-1} L_{md}^t \leq 0$ décrite dans l'équation (6.6) ne doit jamais arriver, car elle implique que l'interférence est détectée *a posteriori*, *i.e.*, une fois que les deux câbles se sont croisés sans qu'aucun câble n'ait été relâché. En fait, l'algorithme de prédiction décrit dans la section 6.3 empêche que les effets indésirables résultants de cette condition ne se produisent.

Une fois que l'interférence est détectée, la procédure de la détermination géométrique d'une interférence devrait aussi être appliquée entre les sections des câbles où l'interférence survient de manière à être en mesure de déterminer les interférences chaînées avec les autres câbles et aussi toutes les autres types d'interférences avec la plate-forme ou la structure de l'interface de locomotion. Entre autres, les interférences telles que le contact entre deux câbles supports ou deux câbles relâchés ne sont pas permises par l'algorithme et appartiennent donc au *domaine des interférences instables*, une série de cas pathologiques nommés *interférence hors-domaine* (IHD) qui doivent être considérés en tout temps pendant la détermination du point d'interférence. Il faut noter aussi que l'interférence entre un câble relâché et une arête de la plate-forme n'est pas autorisée puisque l'effort appliqué sur la plate-forme dépend de cette interférence.

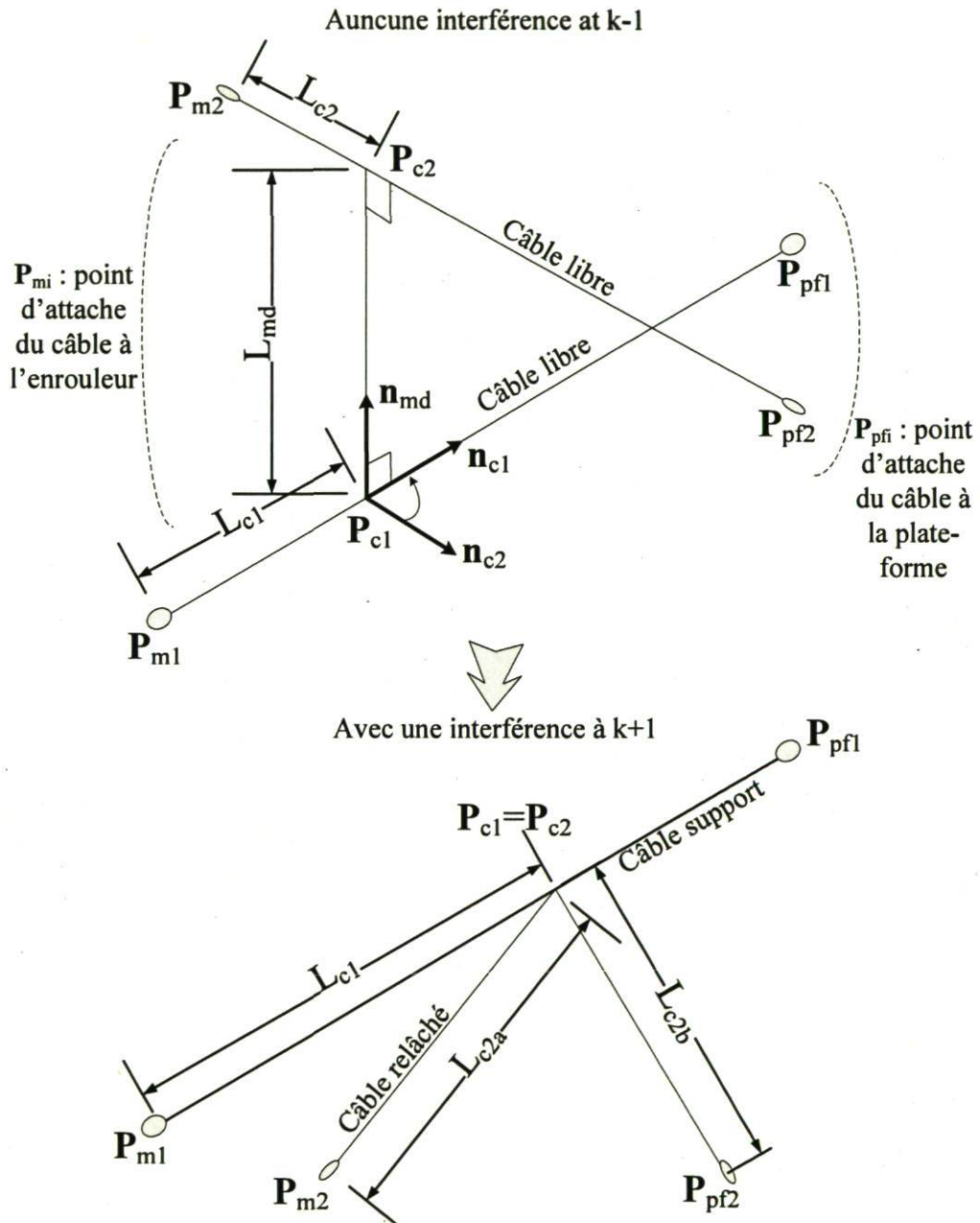


Figure 6.2: Conditions des interférences

6.2.2 Détermination du point d'interférence

Un câble relâché est défini en deux sections, une de chaque côté d'un point d'interférence sur le câble support. Il est possible de déterminer les coordonnées de ce point sans jamais calculer les forces impliquées simplement en observant que la longueur d'un tel câble relâché est minimisée en tout temps (en assumant que la friction au point d'interférence et que le comportement non idéal d'un câble peuvent être négligés) puisque l'asservissement articulaire maintient le câble avec une tension minimale selon les contraintes de l'algorithme de l'ODT (selon la section 6.1.2).

Dans la situation d'un comportement réel d'une interférence, l'équilibrage statique des forces au point de contact génère une déflexion du câble support. Cependant, cette déflexion peut être négligée pour la détermination du point de contact non seulement parce qu'il n'y a pas de déflexion au début et à la fin d'une interférence, mais aussi parce que la géométrie de l'interface de locomotion et les trajectoires utilisées dans les simulations veillent à ce que les interférences possibles ne conduisent pas à de grands angles de déflexion. L'utilisation de cette approximation suppose que le câble support demeure droit lorsqu'une tension minimale est appliquée dans le câble relâché, ce qui simplifie grandement les calculs du point d'interférence puisqu'il correspond uniquement au minimum absolu de la longueur totale du câble relâché. Ce minimum peut être calculé en utilisant la première dérivée de la longueur avec (6.9) :

$$\text{minimiser} \quad \{L_{c2a} + L_{c2b}\}, \quad (6.9)$$

$$\text{sous} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{P}_c = (\mathbf{P}_{pf1} - \mathbf{P}_{m1})\eta + \mathbf{P}_{m1} \\ 0 \leq \eta \leq 1 \\ \eta = f(L_c), \end{array} \right. \quad (6.10)$$

dans laquelle le point d'interférence \mathbf{P}_c ($\mathbf{P}_c = \mathbf{P}_{c1} = \mathbf{P}_{c2}$) joue le rôle du point d'attache du câble (à la position de l'enrouleur) pour le câble relâché correspondant pendant l'évaluation de la matrice \mathbf{W} provenant de l'équation (6.1). En d'autres mots, l'architecture du mécanisme (et de sa géométrie), partiellement définie par \mathbf{W} , est modifiée lorsqu'une interférence se produit. Il est à noter que la tension dans le câble relâché, calculé par l'ODT, est dans le sens et la direction du vecteur $(\mathbf{P}_{pf2} - \mathbf{P}_c)/\|\mathbf{P}_{pf2} - \mathbf{P}_c\|$.

Pour éviter les manipulations des dimensions des matrices lors du calcul du PGI et du PGD, la longueur théorique du câble en interférence est calculée à chaque nouvelle pose de la plate-forme et la mesure de l'encodeur du moteur est remplacée par cette valeur théorique. Cette valeur théorique correspond simplement à la distance entre l'enrouleur et le point d'attache de câble respectif sur la plate-forme. La longueur du câble réelle doit cependant être conservée lors du calcul des distances entre les câbles utilisés dans la détermination des interférences. Cette stratégie est aussi utilisée pour des fins de sécurité lorsqu'un câble est coupé ou endommagé.

6.2.3 Selection du câble à relâcher

Une interférence entre deux câbles libres peut se produire à n'importe quel temps dans le parcours d'une trajectoire. Cette interférence est caractérisée par le choix du câble qui doit être relâché. L'approche qui est proposée pour la mise en oeuvre du processus de sélection est résumée dans la figure 6.3, où chaque étape de l'algorithme est numérotée entre 1 et 5. Les étapes peuvent être divisées comme suit : les étapes 1 et 2 se concentrent sur l'analyse de l'espace de travail, les étapes 3 et 5 vérifient le nombre total de câbles relâchés pour chaque plate-forme et l'étape 4 compare les valeurs des tensions dans les deux câbles.

La configuration de l'espace de travail doit être analysée en premier lieu pour vérifier si le relâchement d'un des deux câbles conserve la pose estimée de la plate-forme complètement contrainte dans l'espace (étape 1). Ceci peut résulter en quatre cas distincts (étape 2) :

- n'importe lequel des câbles relâchés génère une pose dans l'espace de travail (cas 1);
- câble 1 relâché : seule la plate-forme respective est dans l'espace de travail (cas 2);
- câble 2 relâché : seule la plate-forme respective est dans l'espace de travail (cas 3) et
- n'importe lequel des câbles relâchés génère une pose à l'extérieur de l'espace de travail (cas 4).

Lorsque le premier cas se produit, la sélection du câble est déterminée si l'interférence survient entre deux câbles de la même plate-forme ou des deux plates-formes. Dans certaines architectures cependant, une plate-forme peut être asservie avec plus de huit câbles. Dans ce cas, le câble à être relâché lorsque la distribution des tensions est homogène, dépend du nombre total de câbles relâchés par plate-forme, puisque l'algorithme tente de minimiser le nombre de câbles relâchés par plate-forme de manière à limiter les effets néfastes, soit la réduction de la dimension de l'espace de travail et l'augmentation potentielle des discontinuités dans les valeurs des tensions calculées. Ensuite, l'algorithme sélectionne le câble qui possède la plus faible tension.

Si les cas 2 et 3 surviennent, le câble à relâcher est simplement celui qui s'assure que la plate-forme demeure à l'intérieur de l'espace de travail. Le quatrième cas, où les deux plates-formes quittent l'espace de travail, est une situation qui ne doit jamais se produire, puisqu'aucun câble ne peut être relâché sécuritairement. Ceci correspond à un autre cas pathologique du IHD qui doit être traité de la même manière qu'un chien de garde, *i.e.*, tout le système est conservé dans un état passif en attendant que la situation s'améliore.

Une fois que le choix est réalisé, l'ODT ajuste la tension maximale allouée τ_{max} , dans les contraintes définies de l'équation (6.1), à une valeur minimale à la condition que toutes les tensions dans les câbles relâchés demeurent au-dessus de τ_{min} puisqu'elle correspond à la limite minimale qui réduit le fléchissement tout en assurant que le procédé n'est pas ressenti par l'utilisateur.

6.3 Réduction de la discontinuité de la tension

Le relâchement d'un câble peut produire des discontinuités de tensions dans tous les câbles puisque la géométrie du mécanisme est modifiée dans l'ODT. Combinées à la latence (temps de stabilisation) de l'asservissement articulaire, ces discontinuités peuvent produire un dépassement dans la partie transitoire qui entrave le processus d'équilibrage du torseur cartésien, ce qui résulte en une diminution de la transparence (diminution de la précision du rendu haptique).

Pour éviter ce problème, un ajustement des contraintes est appliqué avant et après

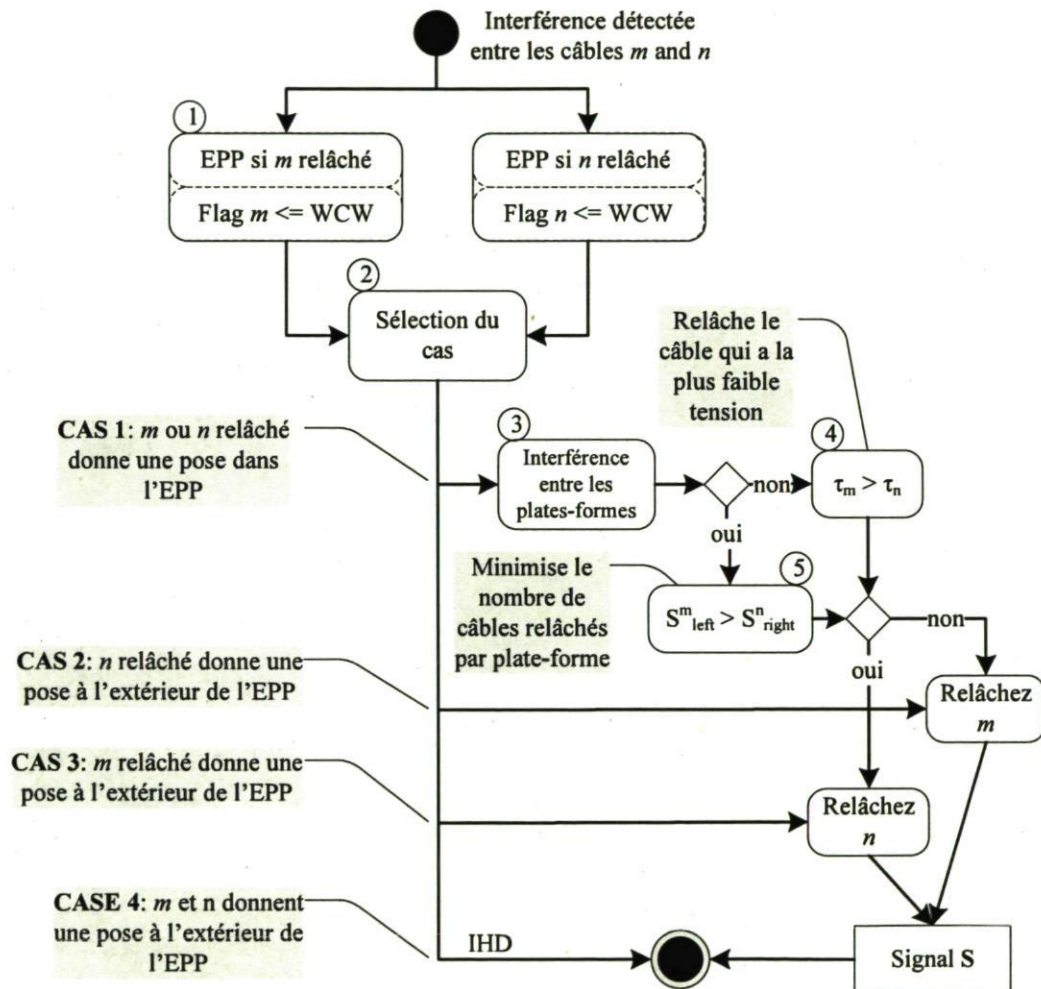


Figure 6.3: Algorithme de la sélection du câble à relâcher

qu'une interférence soit détectée afin de parvenir à une solution sub-optimale donnée par l'ODT. À chaque pas de calcul, cet ajustement doit être à l'intérieur d'une *variation maximale relative de la tension* $\Delta\tau_{mt}$. En effet, la meilleure solution de l'ODT englobe les trois conditions suivantes qui ne peuvent pas toujours être satisfaites en même temps :

- l'équation (6.1) doit toujours être satisfaite ;
- la continuité de la solution doit être satisfaite et
- la solution devrait être optimisée.

Par exemple, la condition de continuité l'emporte sur la condition d'optimisation pendant une interférence et assure que la variation de tension dans un câble ne dépasse jamais $\Delta\tau_{mt}$, valeur définie dans la section 6.3.2. $\Delta\tau_{mt}$ est limitée par $\Delta\tau_c$, la *variation maximale absolue de la tension* pour limiter les dépassements de la boucle de rétroaction. Avant de définir les contraintes d'ajustement pour prévenir les discontinuités par l'ODT, la section suivante présente l'algorithme de l'Estimation du Temps d'Arrivée d'une Interférence (ETAI) pour prédire le temps et la position d'une interférence.

6.3.1 Estimation du temps d'arrivée de l'interférence (ETAI)

Il est possible d'estimer avec précision le temps restant avant qu'une collision se produise (*i.e.* le début ou la fin d'une interférence) si les trajectoires des deux câbles sont connues exactement. Cependant, dans un système avec des trajectoires aléatoires qui dictent le mouvement des plates-formes, il est possible d'estimer les trajectoires futures en utilisant les données de position précédemment accumulées du mouvement de la plate-forme, de manière à calculer une ETAI approximative qui peut finalement modifier les contraintes de l'ODT afin de réduire les discontinuités. Puisque la quantité trouvée par l'ETAI est d'une importance cruciale, deux approches pour cette estimation sont simulées avec une comparaison de leurs performances.

La première méthode consiste à calculer le temps estimé \hat{t} , en utilisant la formulation basée sur la distance entre deux câbles telle que définie par (6.11). Les racines de cette équation donnent une approximation du temps restant avant qu'une interférence se produise. Comme il s'agit d'une forme quadratique, son calcul est direct :

$$0 = \sum_{j=0}^n \frac{d^j L_{md}}{dt^j} \frac{\hat{t}^j}{j!}, \quad (6.11)$$

où L_{md} est représentée dans la figure 6.2.

Cependant, cette méthode peut seulement prédire le temps juste avant une interférence mais ne fournit pas le point du croisement entre les câbles. En outre, elle ne peut pas vérifier si ce point est situé sur l'extension virtuelle du câble. Ces problèmes sont abordés par la deuxième méthode, où le point d'interférence (le point du croisement entre les câbles) peut être calculé avec (6.12) :

$$\mathbf{g}_1 u_1 + \mathbf{P}_{m1} = \mathbf{g}_2 u_2 + \mathbf{P}_{m2} \text{ avec,} \quad (6.12)$$

$$0 < u_i < 1 \quad (6.13)$$

$$\mathbf{g}_i = \sum_{j=0}^n \frac{d^j (\mathbf{P}_{pfi} - \mathbf{P}_{mi})}{dt^j} \frac{\hat{t}^j}{j!} \quad (6.14)$$

$$\mathbf{g}_i = [g_x, g_y, g_z]_i^T. \quad (6.15)$$

La résolution analytique de (6.12) conduit à (6.16), ce qui correspond à une équation quartique lorsque $n = 2$ et à une équation sextique lorsque $n = 3$. Une interférence valide au temps estimé \hat{t} correspond simplement à une racine réelle positive de (6.16) respectant les contraintes définies dans (6.13) :

$$\begin{aligned} 0 = & (g_{z1}g_{y2} - g_{y1}g_{z2})\Delta P_{mx} + \\ & (g_{x1}g_{z2} - g_{z1}g_{x2})\Delta P_{my} + \\ & (g_{y1}g_{x2} - g_{x1}g_{y2})\Delta P_{mz}. \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\Delta \mathbf{P}_m = \mathbf{P}_{m2} - \mathbf{P}_{m1} \quad (6.17)$$

$$\mathbf{P}_{mi} = [P_{mx}, P_{my}, P_{mz}]_i^T. \quad (6.18)$$

La valeur résultante de l'ETAI (représentée par $\tilde{\delta}_e$) est exprimée en Hertz-seconde tel que $\tilde{\delta}_e = F_e \cdot \hat{t}$, où F_e est la fréquence d'échantillonnage. Cet algorithme est appelé

aussitôt que la distance entre deux câbles diminue sous un seuil ϵ_r ($\epsilon_r \gg \epsilon_e \geq \epsilon$), et l'ETAI est uniquement considérée lorsque le temps estimé \hat{t} descend en dessous d'un horizon de prédiction. Étant donné que la contrainte (6.8) est satisfaite, la distance entre deux câbles ne tombe jamais au-dessous de zéro, car le câble est relâché avant l'interférence. En fait, l'ETAI correspond simplement à une évaluation du nombre de pas de calcul avant que le croisement entre les deux câbles se produise.

Pour éliminer ou réduire les discontinuités, la tension dans le câble à relâcher doit être suffisamment lisse et doit être graduellement diminuée vers sa tension minimale τ_{sag} . Le taux de variation de la tension est déterminé selon une fonction de l'ETAI de même que la valeur de la tension actuelle τ . De la même manière, la tension dans le câble support doit être augmentée ou diminuée graduellement dans les limites exprimées par la *variation relative maximale de la tension* $\Delta\tau_{mt}$ qui est proportionnelle à la tension actuelle.

Il est à noter que le câble qui doit être relâché est choisi en utilisant l'algorithme de sélection présenté à la section 6.2.3. Cet algorithme utilise l'espace de travail futur, qui dépend de la position du câble estimée $\hat{\mathbf{P}}_{pfi}$ à \hat{t} et qui est calculé en utilisant l'équation (6.19) :

$$\hat{\mathbf{P}}_{pfi} = \mathbf{g}_i|_{\hat{t}} + \mathbf{P}_{mi}. \quad (6.19)$$

En outre, ce câble sert de base grâce à laquelle le lissage dans la partie transitoire de toutes les autres tensions des câbles concernés est par la suite calculé.

6.3.2 Ajustement des contraintes dans l'ODT

L'introduction des paramètres de la variation maximale relative et absolue de la tension garantit que les discontinuités au sein des différentes gammes de tensions sont traitées de la même manière. Le paramètre de la variation relative maximale de la tension peut être exprimé comme $\Delta\tau_{mt} = \alpha\tau$ | $\alpha\tau < \Delta\tau_c \wedge 0 < \alpha < 1$ pour tous les câbles, où τ est la tension courante, α est un paramètre de performance et τ_c est la variation absolue maximale de la tension qui prévient des dépassements excessifs dus à des

déformations mécaniques. Le paramètre α est ajusté comme une fonction de la discontinuité maximum supportée par l'asservissement articulaire $\alpha\tau_{max} \ll \Delta\tau_c$ pour un pas de calcul. Actuellement, α est déterminé expérimentalement pour atteindre de bonnes performances. Les conditions qui définissent les contraintes de tensions maximales et minimales sont résumées dans (6.20) :

$$\begin{aligned} &(\tau_{min} > \tau - \Delta\tau_{mt}) \wedge (\tau_{min} > \tau_{sag}) \\ &(\tau_{max} < \tau + \Delta\tau_{mt}) \wedge (\tau_{max} < \tau_{reel}), \end{aligned} \quad (6.20)$$

où τ_{max} et τ_{min} sont les contraintes de tensions utilisées dans l'ODT, $\Delta\tau_{mt}$ est la variation relative maximale de la tension, τ_{sag} est la tension minimale qui limite le fléchissement du câble et τ_{reel} est la tension maximale qu'un enrouleur peut maintenir sécuritairement en régime permanent.

La figure 6.4 montre trois ensembles solutions de l'ODT lorsque l'algorithme de l'ETAI est utilisé. Le premier ensemble se produit lorsque la plate-forme est à l'extérieur de l'espace dynamique puisque le torseur appliqué ne peut pas être équilibré par des tensions dans les câbles tout en satisfaisant les contraintes. Dans le second ensemble, la géométrie du mécanisme permet la gestion de certaines interférences en commandant la tension du câble à sa tension minimale τ_{sag} . Un cas intermédiaire, le troisième ensemble de solutions, montre que la commande d'une tension minimale ne peut pas être appliqué. Lorsque la première et la troisième situation se produisent, la géométrie du mécanisme doit être revue pour supporter ces interférences. De plus, la figure 6.4 démontre l'origine de la discontinuité des tensions lorsqu'un câble est relâché sans l'utilisation de l'algorithme de l'ETAI. Ces discontinuités proviennent de la variation soudaine des dimensions de l'orthotope ou par l'action d'enlever un câble à l'intérieur de la géométrie du mécanisme.

La tension d'un câble passif est le seul paramètre de l'asservissement articulaire pendant une interférence. En effet, il dépend seulement de la géométrie du câble, car elle correspond à la tension minimale qui doit être appliquée afin d'empêcher un fléchissement du câble tout en limitant la friction au point d'interférence. Cette tension, nommée τ_{sag} , devient ainsi le paramètre initial avec lequel les autres valeurs de tensions seront contraintes (τ_{max} et τ_{min}), en fonction des conditions de l'équation (6.21)

$$\begin{cases} \tau_{max} = \tau_{reel} \\ \tau_{min} = \tau_{sag} \end{cases}$$

La tension dans le câble qui sera relâché doit approcher de τ_{sag} lorsque $\Delta\tau$ tend vers zéro et lorsque $\tilde{\delta}_e$ s'approche de l'unité. Il est à noter que $\Delta\tau$ peut prendre des valeurs négatives lorsque τ_{sag} augmente en fonction de la longueur du câble. La convergence est assurée si $\tilde{\delta}_e$ diminue à chaque pas de calcul jusqu'à ce que l'interférence se produise. Finalement, une procédure similaire à (6.21) est appliquée avant la fin d'une interférence puisqu'il est possible d'y retrouver aussi des discontinuités. Dans ce cas, les tensions dans les deux câbles sont ajustées graduellement à leurs valeurs optimales en utilisant (6.23) :

$$\begin{aligned} \tau + \Delta\tau_{mt} < \tau_{reel} &\Rightarrow \tau_{max} = \tau + \Delta\tau_{mt} \\ \tau + \Delta\tau_{mt} > \tau_{reel} &\Rightarrow \tau_{max} = \tau_{reel} \\ \tau - \Delta\tau_{mt} > \tau_{sag} &\Rightarrow \tau_{min} = \tau - \Delta\tau_{mt} \\ \tau - \Delta\tau_{mt} < \tau_{sag} &\Rightarrow \tau_{min} = \tau_{sag} \end{aligned} \tag{6.23}$$

6.4 Résultats pour une démarche lente et normale

L'algorithme de la gestion des interférences est, en premier lieu, appliqué aux câbles d'une seule plate-forme (section 6.4.4). Cette première expérience de simulation se concentre sur le problème de choisir le câble à être relâché en tout temps pour une trajectoire et un torseur donnés (section 6.4.1). Les paramètres décrivant les interférences peuvent être calculés par la suite. Les trajectoires utilisées pour les deux plates-formes sont les mêmes que celles utilisées sur la commande haptique cartésienne, soit une marche normale et droite [31] pour un marcheur de 67 kg. Aussi, le torseur correspond aux forces et aux moments mesurés sous le pied du marcheur sur un plancher rigide avec un signal échantillonné à 100 Hz. Il est à noter que ladite trajectoire n'a pas d'interférence avec la géométrie de la plate-forme et celle de l'interface de locomotion et, par conséquent, un point d'attache du câble P_{mi} doit être déplacé afin de générer une interférence. Finalement, d'autres expériences sont réalisées avec plus de huit câbles afin de mieux connaître le comportement du système lors de la gestion des interférences.

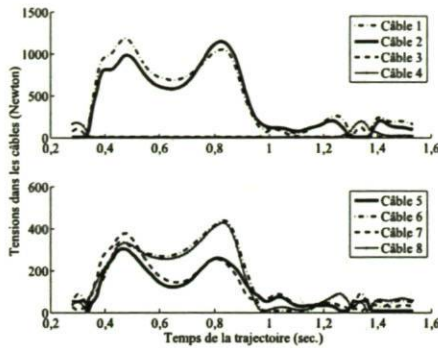


Figure 6.5: Solution de l'ODT pour tous les câbles de la plate-forme de droite (sans interférence et sans tension minimale)

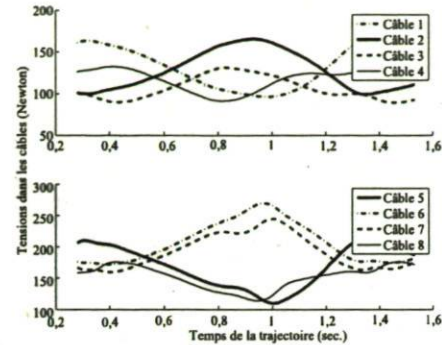


Figure 6.6: Tensions minimale τ_{sag} pour la plate-forme de droite

Puisque ce chapitre présente uniquement des simulations, un clip vidéo est présenté à la section A.1.1.4 pour démontrer que cette stratégie peut être utilisée.

6.4.1 Paramètres de la simulation

Préalablement à l'exécution de l'algorithme de la gestion des interférences, une analyse est réalisée sur la plate-forme de droite afin de déterminer les tensions des câbles sur l'architecture initiale, *i.e.* sans interférence potentielle pour la trajectoire et sans appliquer les tensions minimales nécessaires pour limiter le fléchissement. Les trajectoires et les torseurs appliqués sur les plates-formes dans les six DDL sont présentés dans [33]. Les résultats de cette analyse sont montrés à la figure 6.5. Cette analyse confirme qu'il n'y a pas de discontinuité apparente, que toutes les tensions satisfont les contraintes et que certaines tensions demeurent relativement faibles au cours de l'ensemble de la trajectoire. Les tensions faibles peuvent être expliquées par la géométrie du mécanisme car les câbles dont les points d'attache sont situés sous la plate-forme n'ont pas à travailler contre la gravité pour une trajectoire qui émule la marche. Mais, ces câbles sont toujours nécessaires afin de complètement contraindre la plate-forme de manière à permettre toute trajectoire arbitraire ainsi que de tout retour d'efforts générés par l'environnement virtuel. Il est à noter que les tensions élevées dans les câbles 1 et 2 ne sont pas seulement que la conséquence du support de la masse de l'utilisateur, mais sont aussi causées par la brève et intense décélération lorsqu'un pied entre en contact

avec le plancher. En effet, la première tension crête (à environ 0.5 seconde) correspond au contact du talon avec le plancher, et la seconde tension crête (à environ 0.9 seconde) arrive lorsque les orteils poussent le plancher juste avant de quitter le sol.

6.4.2 Analyse de la tension minimale dans les câbles

Les tensions minimales qui doivent être appliquées dans tous les câbles sont calculées afin de réduire le fléchissement, et donc afin de diminuer la valeur de ϵ_e utilisée dans l'algorithme de la gestion des interférences (section 6.3). Les équations (5.5) et (5.7) impliquent que des valeurs de tensions élevées réduisent la déviation maximum en position ϵ tel que défini par le critère de performance β à l'équation 5.3. Cependant, il y a un compromis à faire : une tension élevée augmente la friction au point d'interférence ce qui peut générer des vibrations, des déformations mécaniques et une elongation excessive du câble. Ce compromis, qui est choisi pour l'application et qui dépend du ratio de la différence de tension relative, est défini par le seuil τ_{sag} illustré à la figure 6.6.

6.4.3 Analyse de la prédiction de l'interférence (ETAI)

L'analyse de l'ETAI est réalisée à l'aide de la trajectoire définie précédemment, afin de simuler adéquatement les interférences pour une plate-forme. Comme pour la section 6.4.4, dans les simulations où des interférences ont lieu, le point d'attache du câble 6 est déplacé (une translation de 0,35 mètre vers de haut à partir de sa position originale) afin de générer trois interférences avec le câble 2. Dans toutes les autres simulations, la configuration originale est utilisée.

La figure 6.7 montre les événements pour le début et la fin de chaque interférence avec la valeur de l'ETAI correspondante pour chaque pas de calcul. L'ETAI est évaluée en utilisant les trois équations suivantes : la forme quadratique de la distance normale entre les deux câbles selon l'équation (équation (6.11)), la forme quartique représentant les coordonnées de l'espace-temps euclidien pour chaque interférence, ainsi que son homologue de la forme sextique de l'équation (équation (6.16)).

Sur cette figure, les simulations montrent des résultats similaires pour les formes

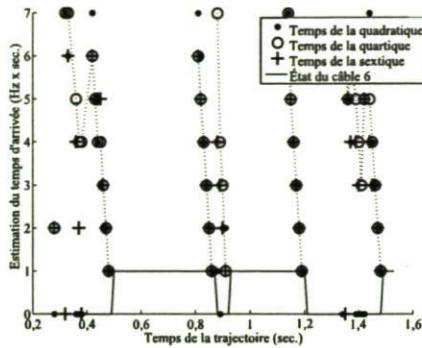


Figure 6.7: Estimation du temps d'arrivée de l'interférence

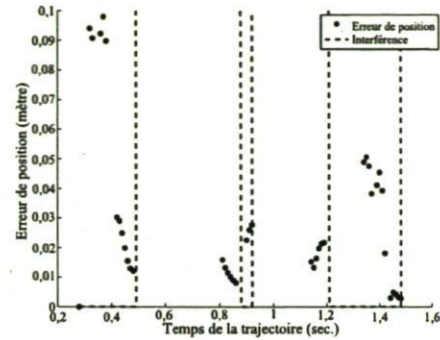


Figure 6.8: Erreur de position par rapport à celle estimée par l'ETAI

quadratique et quartique, ce qui est prévisible puisque l'horizon de prédiction est court (les meilleurs résultats sont obtenus avec un horizon de prédiction de $\tilde{\delta}_e < 7$). Cependant, la performance de la forme sextique semble dégénérer même si certains points correspondent à ceux obtenus avec les autres méthodes. Ce résultat peut être causé par les erreurs numériques résultant de l'évaluation de l'accélération. Cela suggère que la précision globale de l'ETAI pourrait être améliorée par l'utilisation d'un meilleur algorithme de calcul des dérivées, et en augmentant la fréquence d'échantillonnage. En fait, l'algorithme de calcul du n ème ordre de la dérivée de la position repose actuellement sur la formulation de Lagrange, ce qui implique que l'erreur augmente de façon monotone avec l'ordre de la dérivée. En se basant sur ces résultats, la forme quartique est choisie comme la méthode préférée pour évaluer le temps avant une interférence et pour réduire les discontinuités.

La précision de la prédiction utilisée avec la forme quartique peut alors être évaluée par le calcul des distances entre les positions réelle et estimée; cette dernière étant calculée en utilisant (6.19). La figure 6.8 montre que l'erreur diminue lorsque l'ETAI diminue. De plus, l'erreur est toujours plus petite de 0,03 mètre lorsque l'ETAI converge vers l'unité.

6.4.4 Interférence entre les câbles de la plate-forme de droite

Les solutions (sans appliquer les tensions minimales τ_{sag} et sans l'évaluation de l'ETAI) pour les tensions dans les câbles et l'analyse de l'espace de travail sont illustrées

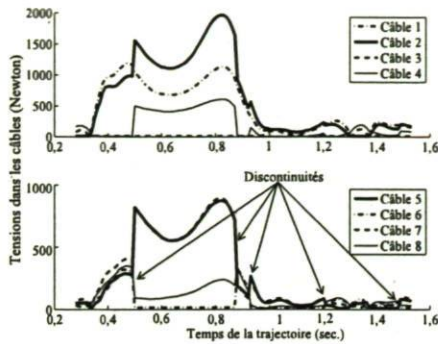


Figure 6.9: Solution de l'ODT avec la gestion des interférences (interférence entre les câbles 2 et 6) sans l'ETAI

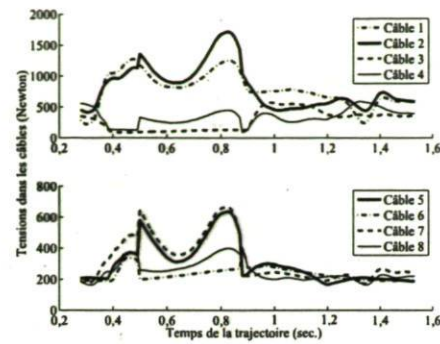


Figure 6.10: Solution de l'ODT avec les contraintes de tensions ($\tau_{min} \geq \tau_{sag}$) et sans l'ETAI

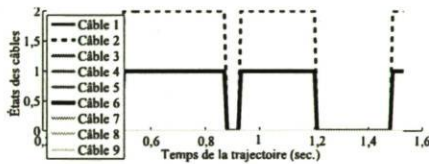


Figure 6.11: États des câbles avec une interférence entre les câbles 2 et 6 pour la plate-forme de droite

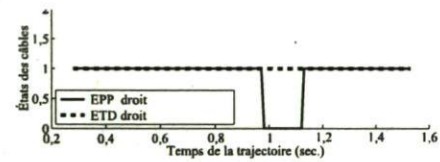


Figure 6.12: Analyse de l'espace de travail avec une interférence entre les câbles 2 et 6 pour la plate-forme de droite

dans les figures 6.9 et 6.12. Lorsque le câble 6 est relâché, les tensions dans les autres câbles produisent des discontinuités qui sont difficiles à asservir, comme le montre la variation de la tension dans le câble support 2 qui est soumis à une augmentation de la force de traction supérieure à 700 N au cours d'un temps de calcul. Le signal des états des câbles S est illustré à la figure 6.11. Selon la description présentée à la section 6.2.1, un câble peut être uniquement que dans un des trois états suivants : libre, relâché ou support, nommé 0, 1 ou 2 respectivement.

Lorsque les tensions minimales sont calculées pour corriger le fléchissement et sont utilisées dans les contraintes de l'algorithme de l'ODT, les discontinuités des tensions prennent la forme illustrée à la figure 6.10. Par la suite, l'algorithme de la réduction des discontinuités est appliqué avec l'ETAI et les résultats sont présentés dans la figure 6.13. Cette figure démontre l'efficacité de l'algorithme.

Finalement, la figure 6.14 est une analyse comparative démontrant l'efficacité de

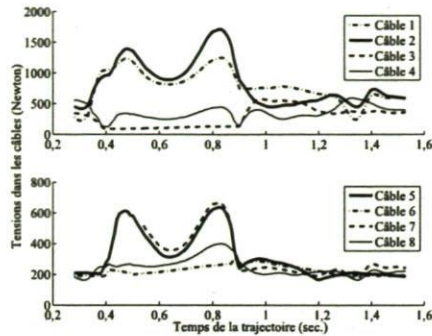


Figure 6.13: Discontinuités des tensions dans les câbles avec l'ETAI

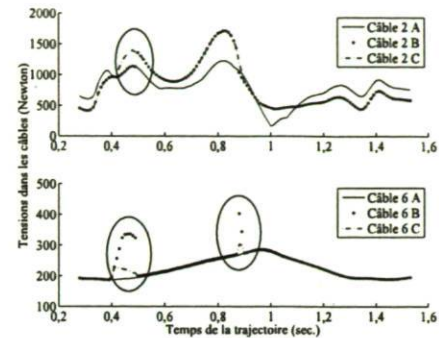


Figure 6.14: Comparaison des tensions pour les câbles 2 et 6 dans les trois configurations

l'algorithme de la réduction des discontinuités qui inclut l'ETAI et la forme quartique de la position des câbles. Trois situations sont présentées : A) une architecture de 9 câbles⁴ avec l'ETAI, B) l'architecture modifiée de 8 câbles sans l'ETAI et C) l'architecture modifiée de 8 câbles avec l'ETAI. Ces simulations montrent qu'il est possible de réduire toutes les discontinuités avant et après une interférence pour des architectures différentes.

6.4.5 Interférence entre les câbles des deux plates-formes

La solution proposée dans ce chapitre est aussi évaluée pour des interférences entre les câbles des deux plates-formes. Ce cas est très intéressant puisqu'il peut être appliqué à n'importe quel système dans lequel plusieurs mécanismes entraînés par des câbles partagent le même espace de travail. Il serait, par exemple, possible d'ajouter au mécanisme actuel des plates-formes pour un harnais et pour les mains. L'interférence qui est étudiée dans cette section est différente de celle de la dernière section : les hauteurs des deux points d'attache des câbles 6 des deux plates-formes sont déplacées vers le bas de la même quantité afin de produire quatre interférences.

La figure 6.15 montre l'état des câbles pour chaque plate-forme lorsque les tensions minimales et que la correction avec l'ETAI sont appliquées. Puisqu'il y a seulement une interférence permise par plate-forme (sept câbles sont nécessaires pour asservir les six

4. Le neuvième câble est placé à la position originale du câble 6.

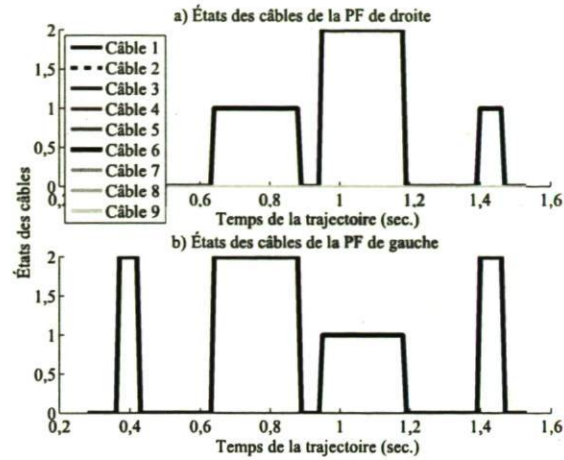


Figure 6.15: États des câbles dans le cas d'interférences entre les deux plates-formes

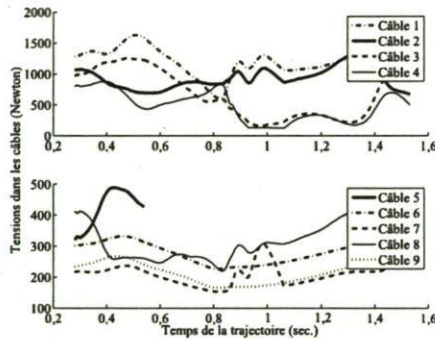


Figure 6.16: Tensions dans les câbles de la plate-forme de gauche dans le cas d'interférences entre les deux plates-formes

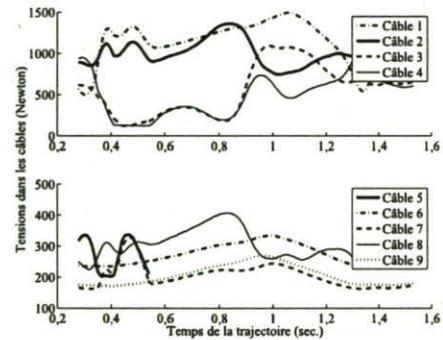


Figure 6.17: Tensions dans les câbles de la plate-forme de droite dans le cas d'interférences entre les deux plates-formes

DDL), le câble qui doit être relâché est choisi par celui qui possède la plus faible tension tout en maintenant la plate-forme dans l'espace de travail évalué au temps estimé par l'ETAI. Les tensions dans les câbles résultantes en fonction du temps pour les deux plates-formes sont illustrées dans les figures 6.16 et 6.17.

Finalement, les plates-formes sont toujours situées dans l'espace de travail dynamique pour la trajectoire de marche. Il faut noter qu'il reste des tensions crêtes, par exemple à 0.5 seconde pour la plate-forme de gauche et à 1.1 seconde pour la plate-forme de droite qui ne peuvent pas être réduites avec la géométrie actuelle du mécanisme. Une solution possible serait d'ajouter des câbles pour mieux distribuer les valeurs des tensions.

6.5 Conclusion

La principale préoccupation, lors de la gestion des interférences entre les câbles d'un mécanisme, est de veiller à ce que les solutions soient continues en tout temps pour limiter les instabilités. Malheureusement, il n'est pas possible de le garantir avec l'utilisation de la programmation quadratique. En fait, lorsqu'un câble est relâché de son état actif d'actionnement, sa tension peut chuter de sa valeur optimale à la tension minimale prescrite τ_{sag} en un seul pas de temps de calcul, soumettant ainsi brusquement les autres câbles à des variations de tensions élevées qui, comme résultat, peuvent générer des vibrations mécaniques et des instabilités. Ce chapitre présente donc un algorithme de prédiction et de correction qui combine l'ETAI avec une procédure de calcul de l'intersection d'hyperplans pour réduire ou même éliminer les discontinuités dans les câbles lorsqu'une optimisation de la distribution des tensions (ODT) est utilisée. Cette procédure peut être théoriquement améliorée en précision en augmentant l'ordre de la série de Taylor qui approxime chaque trajectoire des câbles et en améliorant l'algorithme du calcul de la dérivée.

Le contrôle et la gestion des interférences sont des défis importants. En effet, ces interférences peuvent être gérées, bien qu'il y ait toujours des risques de l'apparition de discontinuités. Pour certaines applications, il serait possible de gérer les interférences à l'intérieur d'un espace de travail restreint dans lequel les trajectoires sont connues *a priori*, mais ceci ne peut pas être garanti pour un espace de travail étendu avec des trajectoires aléatoires. En effet, la détermination de l'ensemble des interférences qui sont admises dans l'espace de travail et avec une géométrie donnée n'a pas été encore étudiée. Les résultats présentés sont spécifiques à la géométrie choisie pour le mécanisme à l'étude. Ceci signifie qu'une légère modification de la géométrie peut générer différents (et possiblement pires) résultats à l'égard des discontinuités. Par conséquent, la conception de la géométrie qui permet certaines interférences aurait besoin d'un paramètre décrivant ces discontinuités afin de réduire leurs effets sur l'asservissement articulaire et cartésien du mécanisme.

Finalement, un câble relâché pourrait être utilisé activement plutôt que passivement. Cependant, le vecteur de tension qui sera appliqué sur la plate-forme dépendra du point d'interférence. Puisque ce point se déplace en même temps que les deux plates-formes, il sera nécessaire de prévoir du temps de calcul supplémentaire pour déterminer la tension

à appliquer sur la plate-forme. De plus, la variation de tension du câble relâché utilisée pour actionner activement la plate-forme pourrait générer plus de forces de frictions et aussi une plus grande déflexion du câble support au point d'interférence, ce qui augmente grandement la complexité du problème. Finalement, lorsque les angles de déflexion des deux câbles sont élevés, des problèmes de friction sèche peuvent s'ajouter amplifiant les problèmes de vibration dans les câbles. Pour toutes ces raisons, ce chapitre considère que le câble relâché agit passivement tout en étant commandé avec une valeur de tension minimale afin de corriger le fléchissement tout en réduisant la friction et la déflexion des câbles au point d'interférence.

Dans le prochain chapitre, il sera question d'intégrer les connaissances acquises jusqu'ici afin d'élaborer un mécanisme qui permettra non seulement une marche naturelle dans un environnement virtuel, mais qui facilitera aussi la simulation d'un plancher à topologie variable tout en étant omnidirectionnel. En effet, ce chapitre présente une convergence des travaux présentés sur l'optimisation de l'asservissement, sur l'étude de la commande de la tension dans les câbles et sur les interférences. En particulier, le détail de la commande hybride pour le rendu haptique en admittance et en impédance est présenté. Finalement, un robot marcheur comme le Kondo KHR-1HV est embarqué sur le mécanisme pour réaliser quelques expérimentations.

6.6 Travaux futurs

La précision de la simulation peut être améliorée en considérant la déflexion du câble support causée par un effet de levier au point d'interférence, car il pourrait modifier l'orientation des vecteurs de la force appliquée sur une plate-forme. Le résultat étant qu'il existe quelques possibilités où l'ODT ne peut pas garantir l'équilibrage du torseur cartésien appliqué. Cet effet non idéal a été négligé dans ce travail puisque la géométrie choisie ainsi que la trajectoire pour le mécanisme assurent que les câbles ne puissent pas être pliés de façon significative.

De plus, il est possible d'inclure directement les équations du fléchissement du câble plutôt que de contourner ce problème en imposant des restrictions avec des critères de performance pour garantir la précision du point d'interférence. Cela permettrait de réduire les tensions minimales afin d'étendre la plage dynamique du système. Les

travaux futurs porteront sur la conception d'un algorithme de l'ODT qui inclut les effets de la déflexion et qui permet un fléchissement dans les câbles.

Chapitre 7

Commande hybride cartésienne pour le rendu haptique

L'asservissement des dispositifs haptiques, opéré par l'intermédiaire d'un réseau, est une tâche particulièrement difficile dû aux limitations inhérentes au canal de communication. De plus, il y a un compromis entre la qualité des performances du rendu haptique et la stabilité d'interaction entre l'humain et le dispositif tout en garantissant la sécurité nécessaire d'opération. Ces difficultés sont accrues lorsque de grands efforts sont produits par un marcheur qui évolue dans un environnement virtuel à l'aide d'une interface de locomotion tout en simulant la sensation kinesthésique de tous les types d'objets. Une interface de locomotion miniature entraînée par des câbles a donc été conçue afin d'aborder certaines des questions susmentionnées puisque l'usage des câbles comme moyen de transmission mécanique est reconnu pour fournir de nombreux avantages tels qu'une faible inertie, des vitesses et des accélérations élevées ainsi qu'un grand espace de travail, parmi bien d'autres. Un marcheur peut donc naviguer dans un environnement virtuel avec l'aide de deux plates-formes haptiques (une pour chaque pied) qui peuvent être vues comme deux robots parallèles indépendants partageant le même espace de travail tout en étant contraints dans les six degrés de liberté.

7.1 Introduction

La conception de l'interface de locomotion entraînée par des câbles (ILEC) est basée sur le concept des plates-formes programmables ayant un contact permanent avec les pieds, tels que le *Gait Master* [10, 188] et le K-Walker (*Virtual Walking Machine*) [71]. Ce chapitre propose un moteur physique spécialement conçu pour les mécanismes entraînés par des câbles afin de proposer des solutions pour l'interaction entre le modèle du pied virtuel lié à une plate-forme et tous autres types d'objets.

Plusieurs algorithmes de commande ont été proposés pour les interfaces de locomotion afin de mieux ressentir l'immersion dans un environnement virtuel et afin de permettre une réadaptation automatique de la marche¹. Par exemple, le robot de réhabilitation LOKOMAT [73] utilise une méthode de commande hybride en force et en position. La composante de la force ajuste le mouvement de l'orthèse robotisée de la jambe, de manière à influencer le mouvement de l'utilisateur et d'automatiser la thérapie. Le HapticWalker est aussi utilisé dans le même contexte, mais avec une approche différente puisque seulement les pieds sont asservis par des algorithmes de mouvement spécialisés [12]. Cependant, ces stratégies de commande ne sont pas bien adaptées pour des mécanismes actionnés par des câbles lors d'un rendu haptique puisqu'un mécanisme entraîné par des câbles peut être considéré comme un dispositif haptique d'impédance.

Les chapitres précédents ont démontré que les mécanismes entraînés par des câbles ont des avantages substantiels par rapport aux autres mécanismes plus conventionnels afin d'atteindre de meilleures performances. Quelques mécanismes impliquant l'asservissement des câbles ont été conçus avec succès lors de l'étude des algorithmes du rendu haptique. Par exemple, ils ont démontré leur efficacité dans l'entraînement au tennis [189] et dans un simulateur d'attrapé d'une balle [97]. Aussi, le WireMan (ou VIDET) [190], qui implique l'asservissement d'un mécanisme sous-actionné, est conçu pour des utilisateurs malvoyants afin d'explorer l'environnement et de reconnaître la présence d'obstacles.

L'architecture logicielle proposée contient deux principales composantes : le **gestionnaire de l'environnement virtuel** et le **gestionnaire de l'asservissement**.

1. En anglais, l'expression exacte est : *automating walking in rehabilitation* ou plus précisément *Patient-Driven Motion Reinforcement paradigm*.

Le premier contient la définition de l'environnement dans lequel l'utilisateur navigue, qui s'exprime par un moteur de rendu graphique et une interface de communication. La seconde composante calcule et commande les torseurs à partir de deux moteurs physiques pour simuler précisément les contacts avec les objets virtuels (mous ou rigides), permettant ainsi une simulation. L'utilité des deux moteurs physiques est présentée à la section 1.4. Dans ce chapitre, une stratégie de commande hybride en impédance et en admittance est développée en considérant la géométrie des points de contact et les propriétés physiques des objets (rigidité, coefficients de friction, etc.). Cette stratégie combine les bénéfices des deux types de commande à l'interface d'un contact entre le modèle du pied virtuel et l'objet. À l'intérieur du moteur physique proposé, les torseurs d'action imposés par les pieds du marcheur déplacent les plates-formes lorsqu'il n'y a pas de contraintes alors qu'un torseur virtuel déplace l'utilisateur dans l'environnement virtuel lorsqu'un contact est détecté sous ses pieds. Le logiciel exploite aussi le Newton Game DynamicsTM, nommé *le moteur Newton* dans le texte qui suit, pour calculer les points de contact et pour simuler des interactions rigides. La contribution de ce chapitre est la mise en oeuvre d'un moteur physique personnalisé sur le système d'exploitation QNX qui considère deux classes de commande et qui gère les propriétés physiques des objets virtuels en temps-réel. L'objectif directeur est de réduire les problèmes occasionnés par des retards variables sur le canal de communication afin de conserver des performances acceptables des rendus d'admittance et d'impédance. La classe est sélectionnée en fonction de la géométrie spatiale des points de contact générée entre le modèle du pied et l'objet virtuel. Entre autres, la résolution de la friction aux points de contact est obtenue à l'aide d'un algorithme nommé problème d'optimisation des forces (POF).

La deuxième et la troisième section de ce chapitre présentent la stratégie de commande avec la gestion de plusieurs points de contact qui est utilisée pour sélectionner la classe de commande à appliquer sur les DDL d'une plate-forme. La quatrième section présente un moteur physique développé sous l'OS de QNX pour le rendu des forces à chaque point de contact de manière à gérer les différentes propriétés physiques des objets. Ce moteur physique inclut un problème d'optimisation des forces (POF) pour distribuer le torseur mesuré à chaque point de contact de manière uniforme et optimale. Il est conçu pour surmonter certains inconvénients du moteur Newton comme les forces transitoires et les pénétrations qui se produisent lors d'un contact entre le modèle du pied et une surface compliant. Finalement, la dernière section présente quelques simulations de la stratégie de commande et du moteur physique pour des conditions de

Tableau 7.1: Comparaisons des classes de la commande haptique

Impédance	Admittance
Asservit le torseur appliqué sur la plate-forme	Asservit la pose ou la vitesse de la plate-forme
Possibilité d'instabilité lorsque l'utilisateur relâche la plate-forme	Possibilité d'instabilité lorsque la rigidité musculaire augmente
Simule des objets virtuels mous	Simule des objets virtuels rigides

marche normale.

7.1.1 Classes de la commande pour le rendu haptique

Deux classes de commande similaires à celles décrites dans [183] sont déployées pour le rendu haptique : la commande en impédance et la commande en admittance. Comme ces deux classes utilisent les entrées de position et des torseurs, elles sont définies par la sortie ou par la boucle de contre-réaction. Les propriétés de chaque classe sont comparées dans le tableau 7.1.

Dans la littérature, plusieurs mécanismes utilisent ces classes de commande. Entre autres, le *Cobotic Hand Controller* [191] et l'*HapticMaster* [192] sont deux mécanismes qui utilisent la commande en admittance. D'autre part, les dispositifs haptiques *Excalibur* [150] et *Phantom* [193] ont été conçus (comme des dispositifs d'impédance) pour utiliser la commande en impédance.

De plus, deux modèles d'objets virtuels peuvent être définis : un modèle en admittance et un modèle en impédance. En utilisant la théorie des circuits linéaires (ou les quadripôles), il existe quatre topologies possibles, décrites par les matrices d'immitances, que le servocontrôleur peut gérer [194] : la matrice d'impédance Z dans (7.1), la matrice d'admittance Y dans (7.2), la matrice hybride (ou de transfert) T ou H dans (7.3) et la matrice de transimpédance G dans (7.4). Un quadripôle définit la relation entre efforts (f_h , f_e) et les débits (v_h et $-v_e$). Dans les équations 7.1 à 7.4, les variables avec une étoile (par exemple : f_e^* et $-v_e^*$) indiquent un signal numérique :

$$\begin{bmatrix} f_h \\ f_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ -v_e^* \end{bmatrix}, \quad (7.1)$$

$$\begin{bmatrix} v_h \\ -v_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_h \\ f_e^* \end{bmatrix}, \quad (7.2)$$

$$\begin{bmatrix} f_h \\ -v_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ f_e^* \end{bmatrix}, \quad (7.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_h \\ f_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_h \\ -v_e^* \end{bmatrix}. \quad (7.4)$$

La figure 7.1 montre le modèle résultant de l'utilisation des quadripôles avec l'aide des matrices d'immittances. Dans cette figure, les variables sont renommées de manière à décrire les relations entre l'utilisateur (v_h et f_h) et l'environnement virtuel (v_e^* et f_e^*). La stratégie de la commande hybride combinant les deux classes (qui interagit avec les deux modèles des objets virtuels) veille à ce que les mouvements libres et les contacts avec un objet virtuel rigide soient tous les deux rendus de manière réaliste par les plates-formes. La section 7.2 décrit la méthode pour sélectionner la classe appropriée en utilisant la géométrie des points de contact et les propriétés physiques des objets virtuels.

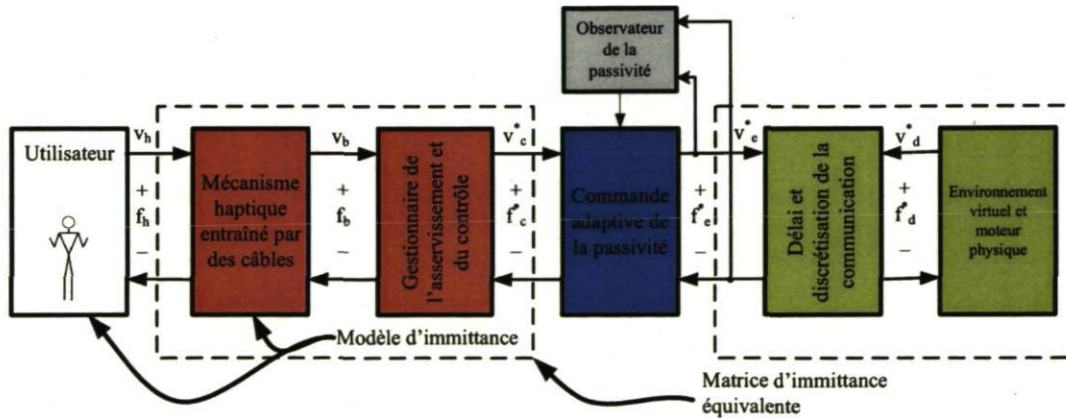


Figure 7.1: Modèle de l'interface de locomotion avec les quadripôles

Cette commande hybride permet d'utiliser les deux méthodes de rendu haptique les plus largement employées dans la littérature. La première est la **méthode par**

pénalité qui génère une force en fonction de l'interpénétration entre les objets [195]. Cette méthode est décrite dans la section 7.4.1 pour un modèle d'impédance. L'autre méthode (**méthode des contraintes** [196]) impose des contraintes de non-pénétration pour chaque point de contact afin de calculer les forces ou les impulsions résultantes avec des algorithmes itératifs comme la programmation linéaire ou quadratique. Le rendu de l'affichage haptique présenté dans ce chapitre utilise un algorithme du problème d'optimisation des forces (POF) qui est résolu avec la programmation quadratique. Cet algorithme est présenté à la section 7.4.2.

7.1.2 Problèmes de stabilité

Un dispositif haptique stable dissipe plus d'énergie que l'asservissement en produit. Cependant, ceci diminue le réalisme du rendu haptique (l'efficacité dans la reproduction des forces simulées) lorsque l'énergie dissipée diminue. Il y a donc un compromis entre la performance et la transparence. Ce compromis, qui est quantifié par une largeur de bande d'impédance [142] et par une fonction de transfert de la transparence [193], est un critère de conception dans plusieurs applications [119].

Les simulations des contacts rigides avec un modèle d'impédance produisent différents résultats selon le type de simulateur utilisé (simulateur par impulsion ou avec un proxy) et rendent généralement le mécanisme instable. Pour éviter ce problème, les contacts rigides sont préférablement simulés avec une commande en admittance, soit avec des contre-réactions en position et en vitesse nulle pour garantir la stabilité.

L'hystérésis de la friction à l'enrouleur a tendance à augmenter les vibrations dans les câbles lorsque les pièces mécaniques en mouvement collent et glissent. En outre, les contacts rigides entre un objet virtuel et le modèle du pied produisent des discontinuités dans les valeurs des tensions qui ont tendance à augmenter ces vibrations. Finalement, les rigidités de l'enrouleur et de la structure mécanique devraient être au moins supérieures à celles des objets virtuels de sorte que les déformations mécaniques ne puissent pas créer plus d'instabilité. À partir de cette analyse, qui exclut en partie les considérations sur le système d'acquisition, six types d'instabilités à l'intérieur d'une architecture d'une commande hybride pour un mécanisme entraîné par des câbles doivent être considérés :

- la vibration des câbles et les discontinuités des valeurs des tensions ;
- la conception mécanique (rigidité, friction, dynamique des actionneurs, résolution des encodeurs, etc.) ;
- la commande hybride avec des incertitudes [197] et avec des joints flexibles [198] ;
- les contacts avec des objets virtuels rigides avec un ou plusieurs points de contact [199] ;
- l’interaction entre un humain et un mécanisme [200] et
- le temps du délai de la communication sur un réseau [201].

La théorie de la passivité dans le domaine temporel a été utilisée pour une commande bilatérale lors de la téléopération lorsqu’il y a un délai variable sur un réseau de communication [202, 203] et pour l’asservissement des interfaces haptiques [204]. La méthode de stabilisation utilise un couplage variable virtuel ² afin de dissiper l’énergie accumulée. Cette théorie est aussi appliquée dans le domaine des fréquences pour ajuster les paramètres d’un filtre d’impédance [205] et pour définir un système passif équivalent [206]. D’autres stratégies sont développées pour la coopération humain-machine par l’ajustement d’un modèle d’admittance qui lie la mesure du torseur appliqué à la sortie en position de la plate-forme [128, 207]. Cet ajustement compense l’énergie additionnelle injectée dans la boucle de rétroaction par l’augmentation de la rigidité du muscle. Cependant, l’utilisation d’un observateur de passivité (OP) et d’un contrôleur de passivité (CP) dans le domaine temporel est suffisamment efficace en quelques pas de temps même lorsqu’un délai se produit sur un réseau ou sur un capteur [208].

La solution apportée par Hannaford avec l’étude de la passivité est moins conservatrice qu’un régulateur pléiotope LQ³ [209] mais elle est moins performante que celle proposée par Duchaine [128, 210]. La stratégie de Duchaine, qui utilise une analyse avec le critère de stabilité de Lyapunov, ne sera pas utilisée puisqu’elle n’a pas été évaluée, jusqu’à ce jour, pour la génération d’une trajectoire avec l’aide d’un modèle d’impédance et puisque le modèle inclut uniquement le modèle de l’humain dans la boucle de rétroaction. En effet, les retards, la discrétisation des signaux et l’énergie active fournie par l’environnement virtuel sont des exemples de cas particuliers qui n’ont pas été étudiés avec le critère de Lyapunov. Le rendu de l’affichage haptique élaboré dans cet ouvrage propose une commande hybride cartésienne et il sera préférable d’utiliser une méthode d’analyse et de commande de la stabilité hybride qui corrige un ensemble de

2. En anglais : *virtual damping parameters*

3. En anglais : *polytopic Linear-Quadratic regulator*

facteurs pouvant affecter la stabilité du rendu.

La passivité dans le domaine du temps a été étudiée pour les deux classes de commande dans [204] et est implantée pour un manipulateur à six DDL dans [211] dans le cas d'un seul point de contact. La passivité qui garantit la stabilité est définie pour tout système où l'énergie générée par l'utilisateur, la boucle de **rétroaction** ou l'environnement virtuel est dissipée dans le dispositif haptique. Dans ce chapitre, le travail prédictif est utilisé puisqu'il a les mêmes propriétés que l'énergie [212] de manière à ce que l'observateur de passivité soit défini par l'équation (7.5) :

$$W(k) = W(k-1) + f_c(k-1)v_c(k) \quad (7.5)$$

$$W(k+1) = W(k) + f_e(k)v_e(k), \quad (7.6)$$

où W est le travail pour un DDL, f_c et v_c sont la force de sortie et la vitesse de sortie envoyées au gestionnaire de l'asservissement alors que f_e et v_e sont les forces et les vitesses générées par l'environnement virtuel. Le contrôleur de passivité peut par la suite être défini par l'équation (7.7) :

$$\text{si } (W(k+1) < 0) \quad (7.7)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{-(W(k+1)-W_D-W_S)}{v_e^2(k)}, & \text{en impédance} \\ \frac{-(W(k+1)-W_D-W_S)}{f_e^2(k)}, & \text{en admittance} \end{cases} \quad (7.8)$$

$$\text{si non } \alpha = 0 \quad (7.9)$$

$$f_c(k) = f_e(k) + \alpha v_e(k), \text{ en impédance} \quad (7.10)$$

$$v_c(k) = v_e(k) + \alpha f_e(k), \text{ en admittance} \quad (7.11)$$

où f_c et v_c sont des variables intermédiaires représentées sur la figure 7.1. Le travail total envoyé au dispositif haptique doit être toujours plus grand que le seuil négatif W_S qui correspond au comportement actif désiré de l'environnement virtuel. Lorsqu'un contact disparaît entre le modèle du pied et l'objet virtuel, l'énergie accumulée doit être dissipée dans un court laps de temps, ce qui produit une force impulsive. Une énergie négative de référence W_D est alors ajoutée pour corriger ce problème [213]. Puisqu'une

quantité d'énergie générée est connue ($W(k+1) - W_D - W_S$), il est possible de calculer le paramètre d'amortissement α afin de dissiper uniquement l'énergie accumulée. Finalement, dans le cas où un modèle en admittance génère la trajectoire de la plate-forme, il est impératif d'ajouter un observateur et une commande de la passivité avant d'envoyer la consigne de vitesse au gestionnaire de l'asservissement. Théoriquement, un modèle en impédance pour le calcul d'une trajectoire ne génère pas d'instabilité (ce qui est rarement le cas en pratique) sauf si l'humain devient actif dans la rétroaction ou si les erreurs et les incertitudes deviennent non négligeables.

7.1.3 Architecture logicielle de l'asservissement des plates-formes

L'architecture matérielle est composée de deux composantes : 1) un module temps-réel non-critique implanté sur un PC standard avec un OS Windows qui gère l'environnement virtuel avec un moteur pour le rendu graphique et 2) un module temps-réel critique développé sous l'OS QNX dont la principale tâche est d'asservir les deux plates-formes haptiques. L'architecture logicielle pour exploiter ces deux modules est donc composée principalement de deux composantes selon la figure 7.2 : le *Gestionnaire de l'environnement virtuel* et le *Gestionnaire de l'asservissement* qui sont tous les deux décrits dans les prochaines sections.

7.1.3.1 Gestionnaire de l'environnement virtuel

Le *Gestionnaire de l'environnement virtuel* (GEV) est responsable du traitement des objets haptiques (dont le modèle du pied virtuel et les objets virtuels), un moteur physique, et un utilisateur virtuel. Cet *utilisateur virtuel* définit les caractéristiques du marcheur qui observe l'environnement virtuel en cohérence avec ses pieds. Dans le *moteur physique*, Newton Game DynamicsTM est utilisé comme un moteur esclave puisque le moteur principal est implanté sur le second PC qui utilise QNX dans le *Gestionnaire de l'asservissement* (voir la section 7.4). La communication entre les deux moteurs physiques est garantie avec l'*interface de communication cliente* et l'*interface de communication serveur*.

Le *Gestionnaire de la scène haptique* (GSH) est la principale interface dans laquelle

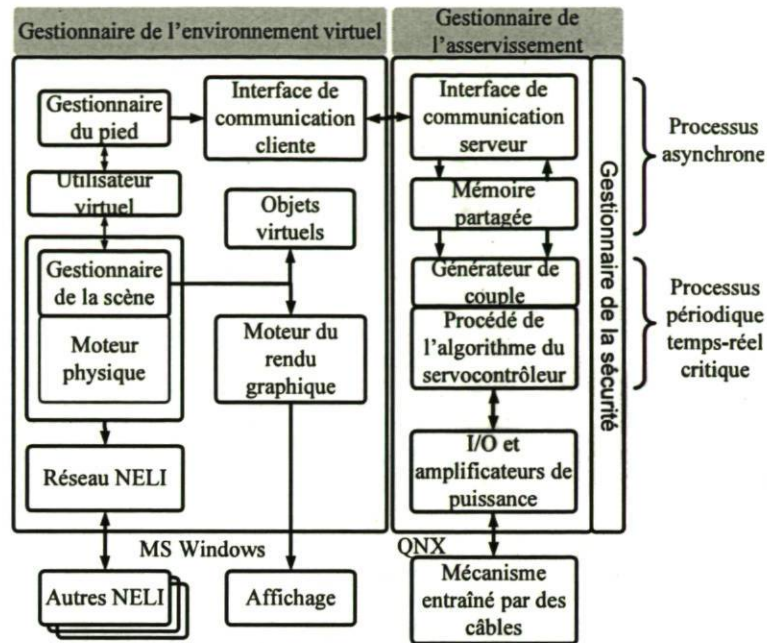


Figure 7.2: Architecture logicielle simplifiée

l'environnement virtuel est construit et configuré. Le GSH est responsable de configurer le moteur Newton selon les exigences de la simulation. Il est aussi responsable de la création, la mise en place, et la destruction des objets virtuels qui ont une présence dans l'environnement.

Le *gestionnaire du pied*, lié à l'*utilisateur virtuel*, communique avec le *gestionnaire de l'asservissement* utilisant une connexion TCP/IP. Une fois que la communication est établie, le moteur de Newton fournit les points de contacts entre chaque modèle du pied virtuel et l'objet virtuel au *gestionnaire de l'asservissement*, ainsi que les vecteurs normaux et tangents à ces points de contact de même que la pénétration à l'intérieur de l'objet. En retour, le *gestionnaire de l'asservissement* répond à ces entrées en fournissant au *gestionnaire du pied* la pose et la vitesse de la plate-forme haptique résultant du contact, de même que le torseur total calculé par le moteur physique personnalisé qui, par la suite, permet le déplacement du pied virtuel et de l'objet.

Le lien de communication entre le GEV et le gestionnaire de l'asservissement doit supporter un taux de rafraîchissement minimum d'approximativement 100 Hz afin de

transférer une rafale de 512 octets ⁴ avec une latence d'au maximum une milliseconde. Bien qu'il existe des solutions matérielles répondant à ces exigences, la question principale reste la latence du processus asynchrone qui est exécuté uniquement lorsque cela est possible. Quelques solutions pour résoudre les limitations de la largeur de bande sont proposées dans [214], où une méthode de prédiction est exploitée avec la connaissance de la perception humaine, soit par la loi de Weber. La définition d'une zone d'insensibilité est utilisée pour la réduction des données. Cette zone consiste à définir des seuils de pose et de vitesse où il n'y a pas de nouvelles informations significatives. Dans le système proposé dans ce chapitre, la quantité d'informations transmises sur le réseau dépend de la sélection de points de contact significatif à partir de ceux évalués par le moteur Newton. En effet, seulement trois points sont nécessaires au gestionnaire de l'asservissement pour sélectionner adéquatement la classe de la commande haptique à appliquer sur le DDL approprié.

7.1.3.2 Gestionnaire de l'asservissement

Le *gestionnaire de l'asservissement* exécute deux processus : 1) un processus périodique temps-réel critique (nommé le *procédé de l'algorithme du servocontrôleur*) responsable d'appliquer la commande hybride et l'algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions dans les câbles, et 2) un procédé temps-réel asynchrone non-critique pour gérer les mises à jour de de l'environnement virtuel entre le *gestionnaire du pied* et le procédé de l'algorithme du servocontrôleur. Les fréquences de rafraîchissement du procédé périodique pour asservir les actionneurs et pour l'acquisition des signaux provenant des capteurs analogiques sont toutes deux à 500 Hz ⁵. Le procédé périodique peut être préempté à tout moment par le procédé asynchrone. Un chien de garde est inclus afin de veiller à ce que le procédé de l'algorithme du servocontrôleur soit exécuté à l'intérieur de la période prescrite. Ce chien de garde, de même que le signal périodique de la fréquence d'échantillonnage, sont programmés sur le matériel du système d'acquisition en utilisant des interruptions de l'OS de manière à ce que ces signaux soient indépendants du logiciel afin d'éviter les problèmes de *dead-lock* et pour assurer une réponse temps-réel critique.

4. Dans le cas particulier de l'application, cette rafale correspond à une structure de données qui contient les informations des points de contact pour les deux pieds.

5. Il faut se référer à la section 3.3 pour bien saisir l'implication du choix de cette fréquence d'acquisition et d'actionnement.

Le *générateur de couple virtuel* associé avec le procédé de l'algorithme du servocontrôleur exécute le moteur physique personnalisé (le moteur maître) (nommé le *Rendu de l'affichage haptique* (RAH) dans la figure 7.3) de même qu'un algorithme de rappel qui maintient le marcheur dans le centre réel de l'interface de locomotion. Des exemples d'un algorithme de rappel sont présentés dans [121] et [215].

Le procédé de l'algorithme du servocontrôleur, détaillé dans la figure 7.3, a une entrée (le capteur d'effort à six DDL) et produit deux sorties (la tension dans les câbles τ_c et la pose de la plate-forme $P_{PF} \in \mathbb{R}^6$). Le torseur de réaction appropriée $h_r \in \mathbb{R}^6$ est calculé à partir des interactions entre les deux moteurs physiques qui détermine quel degré de liberté de chaque plate-forme devrait être commandé soit en impédance ou en admittance. Le torseur d'effort à six DDL peut produire, selon la classe de la commande sélectionnée, un torseur d'action $h_a \in \mathbb{R}^6$ qui déplace la plate-forme en utilisant la commande hybride.

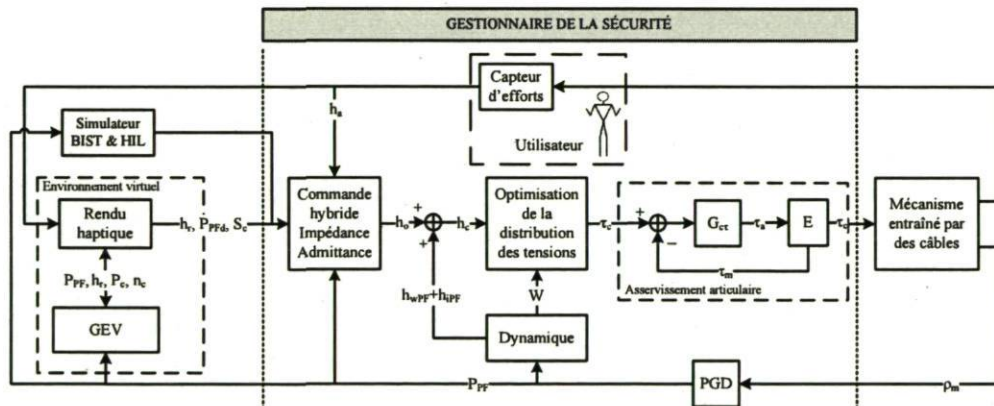


Figure 7.3: Commande hybride dans le processus de l'algorithme du servocontrôleur

Le torseur total h_c appliqué au centre de masse de la plate-forme est équilibré avec des valeurs de tensions positives en utilisant un algorithme d'optimisation de la distribution des tensions [130]. Le résultat étant un ensemble équilibré de valeurs de tensions τ_c , nommé *la consigne*, que le servocontrôleur articulaire tente de poursuivre. La pose de chaque plate-forme est calculée avec le problème géométrique direct (PGD) en utilisant la longueur des câbles ρ_m comme entrée.

Puisqu'un objet virtuel peut être rigide ou mou, deux moteurs physiques peuvent être implantés pour assurer une approche générale qui permet à un marcheur d'ajuster

les réactions physiques entre la plate-forme et l'objet virtuel. Le RAH décide lequel des deux torseurs de réaction calculé par les deux moteurs physiques doit être transféré à la commande hybride. Ce choix dépend des propriétés physiques de l'objet et de la géométrie des points de contact. La détection des points de contact et leurs vecteurs normaux associés à l'interface entre le modèle du pied virtuel et l'objet est évaluée par le moteur Newton. Le RAH utilise ces valeurs pour calculer son propre torseur de réaction \mathbf{h}_r et pour sélectionner la classe de la commande à utiliser pour obtenir le meilleur rendu haptique et une meilleure sensation de l'immersion dans l'environnement.

7.1.4 Compensations cartésiennes

La transparence du mécanisme est cruciale lorsqu'un marcheur utilise un dispositif mécanique à l'intérieur d'un environnement virtuel. En effet, l'utilisateur doit être en mesure d'oublier qu'il est attaché et qu'il utilise un dispositif haptique réel. Seule la physique simulée (comme la friction) à l'intérieur de l'environnement virtuel doit être reproduite sous le pied de l'utilisateur. Pour ce faire, il est très important de connaître le comportement exact du mécanisme en tout temps. Ceci est possible par la connaissance de la dynamique du dispositif.

Dans une interface de locomotion, l'inertie et le poids des deux plates-formes et des capteurs doivent être compensés de manière à améliorer le réalisme du rendu haptique. Par conséquent, \mathbf{h}_c n'inclut pas seulement le torseur appliqué \mathbf{h}_a et l'ensemble des torseurs de réaction calculé à partir de l'interaction, mais aussi l'effet du poids \mathbf{h}_{wPF} et de l'inertie \mathbf{h}_{iPF} du mécanisme.

Puisqu'il existe deux références soit la référence inertielle G_g et la référence de la plate-forme G_{PF} (montrées dans la figure 7.4) et que les déformations de la plate-forme ne sont pas considérées, \mathbf{h}_{iPF} peut être défini avec l'équation 7.12 :

$$\mathbf{h}_{iPF} = - \left[\begin{array}{c} m\mathbf{a}_{cm} \\ \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]\mathbf{Q}^T\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]\mathbf{Q}^T\boldsymbol{\omega} \end{array} \right], \text{ avec} \quad (7.12)$$

$$\mathbf{a}_{cm} = \mathbf{a} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{Q}\mathbf{r}_{cm} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}\mathbf{r}_{cm}), \quad (7.13)$$

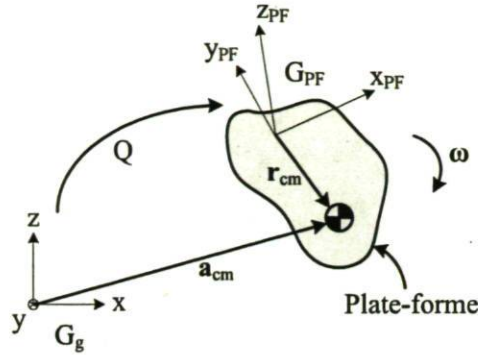


Figure 7.4: Vecteurs pour le calcul des compensations cartésiennes

où m représente la masse de la plate-forme, le vecteur \mathbf{a}_{cm} représente l'accélération du centre de masse de la plate-forme dans le repère G_g , $\mathbf{I}_{cm} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice d'inertie de la plate-forme théoriquement évaluée au centre de masse dans le repère G_{PF} (cette matrice est constante puisqu'elle est évaluée dans le repère G_{PF}), ω est la vitesse angulaire de G_{PF} par rapport à G_g , $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ est la matrice de rotation entre G_{PF} la référence globale G_g (voir aussi l'équation 7.15 pour la définition de \mathbf{Q}) et \mathbf{r}_{cm} est le vecteur reliant l'origine de G_{PF} au centre de masse de la plate-forme évalué dans le repère G_{PF} .

La valeur de \mathbf{h}_{iPF} est négative puisqu'elle enlève la composante inertielle de la plate-forme en mouvement. D'autre part, l'évaluation de \mathbf{a}_{cm} avec un faible niveau de bruit pourrait être difficile avec un encodeur de quadrature de faible résolution à l'intérieur de l'enrouleur. Cette valeur devrait plutôt être évaluée avec un dispositif accéléromètre/gyroscope à six DDL installé près du centre de masse de la plate-forme. Pour le système présenté dans ce chapitre, il n'est pas recommandé d'évaluer \mathbf{a}_{cm} avec le capteur d'effort puisque cette valeur est utilisée dans le moteur physique et dans la commande hybride. Finalement, pour compléter la partie des relations dynamiques reliées à la plate-forme du mécanisme, il est nécessaire de décrire le torseur du poids de la plate-forme \mathbf{h}_{wPF} selon l'équation 7.14 :

$$\mathbf{h}_{wPF} = \begin{bmatrix} mg \\ \mathbf{Q}\mathbf{r}_{cm} \times mg \end{bmatrix}, \quad (7.14)$$

où le vecteur \mathbf{g} est le vecteur de l'accélération gravitationnelle. En ce qui concerne l'inertie des câbles et des enrouleurs, de même que la friction, ils sont considérés par l'asservissement articulaire ⁶.

7.1.5 Plan de la gestion de la sécurité

Dans le contexte d'une interaction entre l'humain et la machine, à l'intérieur d'un espace de travail confiné, la sécurité de l'utilisateur est un des éléments de conception les plus importants à considérer pour éviter les accidents et les blessures. L'algorithme du servocontrôleur possède un questionnaire de la sécurité avec un suivi des erreurs qui devrait être développé avec l'aide d'une étude de risque. Chaque librairie du logiciel, ainsi que chaque composante matérielle, doit posséder des capacités de test automatisées (*Build-In Self Test*) pour implanter un plan de test général dans le cas d'une étude de l'assurance qualité et de la gestion de la sécurité.

De plus, par-dessus l'ensemble des tests automatisés, un simulateur embarqué ⁷ est implanté de manière à démarrer certaines sections du BIST et à asservir partiellement la plate-forme. Quelques documentations à ce sujet sont disponibles dans le standard de IEEE 829. Aussi, il est nécessaire, pour la conception du matériel, de respecter la norme CSA Z432-04 ou ISO 14121. Pour un mécanisme entraîné par des câbles, appliqué au domaine de l'haptique, un minimum de quatre problèmes de sécurité doivent être considérés et documentés :

- la fiabilité des capteurs et la tolérance à une panne (par exemple un câble qui est coupé ou endommagé par la fatigue) ;
- les interférences mécaniques comme les interférences entre les câbles [161] ;
- la gestion des limites de l'espace de travail lorsque la plate-forme est forcée à quitter celui-ci ;
- les interactions entre l'humain et un mécanisme robotisé comme :

1. le dispositif mécanique qui déconnecte l'utilisateur lors d'une instabilité [216] et,

6. L'asservissement articulaire est exécuté par une consigne envoyée au servocontrôleur conformément à la théorie développée dans le chapitre 5.

7. Hardware-in-the-loop

2. le harnais de sécurité qui maintient l'équilibre de l'utilisateur [25], [217].

D'autres aspects de sécurité dans le système doivent **aussi être garantis**. Par exemple, le système doit gérer la destruction des capteurs et les limites des valeurs d'une commande (longueur du câble, les tensions minimales et maximales dans les câbles, le courant maximum à envoyer au moteur, le torseur maximum généré par les moteurs physiques, etc.). Finalement, un chien de garde est ajouté pour s'assurer que le temps de chaque pas de calcul est effectué à l'intérieur de la période de la fréquence d'échantillonnage avec une erreur maximale possible de 5%. Pour le calcul des dérivées et pour réduire le bruit sur ces mesures, les algorithmes doivent considérer cette erreur de même que le décalage temporel généré par la latence des autres processus et par la commutation de contexte de l'OS.

7.2 Commande hybride haptique

Pour tout moteur physique, la commande hybride est une approche générale qui présente les avantages combinés de l'impédance, de l'admittance, et du torseur inertiel nul. La structure de la commande hybride pour une plate-forme est montrée à la figure 7.3 et est détaillée dans la figure 7.5. Deux structures sont implantées, une par plate-forme. Il est tout aussi simple d'ajouter une structure semblable pour l'asservissement d'un harnais ou d'un dispositif pour les mains. La sélection de la classe de la commande est assurée par la matrice $\Pi \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ pour chaque DDL de la plate-forme. Cette matrice Π dépend de l'orientation de la géométrie des points de contact et de l'orientation de la plate-forme.

Lorsque le torseur de réaction \mathbf{h}_r est posé à zéro et que la commande en impédance est sélectionnée par la matrice Π , on obtient le cas particulier d'une commande en torseur inertiel nul (ou commande en force nulle) avec un gain de boucle ouverte G_{ch} ; autrement, la commande en impédance ou d'admittance est appliquée dans le DDL désiré de chaque plate-forme. La commande en admittance pourrait être exécutée avec une boucle de rétroaction en accélération, en vitesse et/ou en position ce qui pourrait produire des résultats expérimentaux différents, comme [165] le mentionne.

La position désirée \mathbf{P}_{PFd} (ou la vitesse désirée) de la plate-forme est définie par les

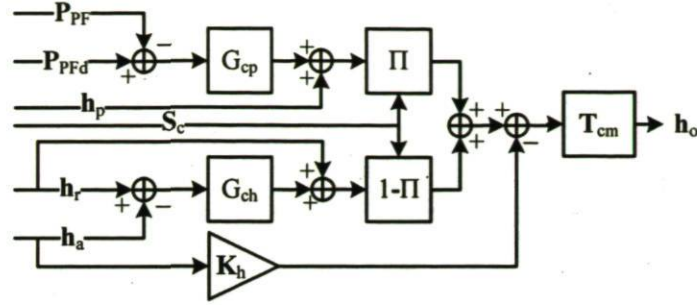


Figure 7.5: Commande hybride adapté à l'haptique

points de contact donnés par le moteur de Newton. Comme la stratégie utilisée par le moteur de Newton, un torseur \mathbf{h}_p doit être ajouté à la commande en admittance pour éviter des pénétrations trop profondes à l'intérieur de l'objet virtuel lorsque la détection de la collision est retardée parce que le taux de rafraîchissement ne se fait pas à temps. Cette stratégie évite aussi le calcul de nouveaux ensembles de points au fur et à mesure que le pied entre dans l'objet. Dans le moteur Newton, le torseur \mathbf{h}_p est calculé avec un modèle d'impédance et il doit être asservi dans le moteur physique puisque la commande est une pénétration nulle pour obtenir un contact rigide. À partir de la figure 7.5, le torseur $\mathbf{T}_{cm}^{-I} \mathbf{h}_o$ à calculer par la commande hybride est défini par l'équation (7.15) :

$$\mathbf{T}_{cm}^{-I} \mathbf{h}_o = \Pi(G_{cp}(\mathbf{P}_{PFd} - \mathbf{P}_{PF}) + \mathbf{h}_p) + (\mathbf{I} - \Pi)(\mathbf{h}_r + G_{ch}(\mathbf{h}_r - \mathbf{h}_a)) - \mathbf{K}_h \mathbf{h}_a, \text{ avec} \quad (7.15)$$

$$\Pi = \mathbf{Q}_o \mathbf{Q}_g \mathbf{S}_c \mathbf{Q}_g^T \mathbf{Q}_o^T, \quad (7.16)$$

$$\mathbf{Q}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{Q} \end{bmatrix}, \quad (7.17)$$

$$\mathbf{Q}_g = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_c & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{Q}_c \end{bmatrix}, \quad (7.18)$$

où G_{cp} est un régulateur (transmittance) qui asservit la position désirée \mathbf{P}_{PFd} (ou la vitesse désirée) de la plate-forme (\mathbf{P}_{PF} est la position mesurée), $\mathbf{Q}_c \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ est la matrice de rotation entre la référence des points de contact G_c et la référence de la

plate-forme G_{PF} , $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ est la matrice de rotation entre G_{PF} la référence globale G_g qui est calculée avec le PGD et dépend de la longueur des câbles ρ_m ; G_{ch} est le gain du torseur qui devrait être suffisamment élevé (mais délimité par les critères de stabilité) pour réduire les erreurs causées par la dynamique et la friction générées par les pièces en mouvement. Une matrice de transfert $\mathbf{T}_{cm} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est utilisée pour calculer la sortie du torseur appliqué au centre de masse de la plate-forme puisque tous les torseurs haptiques sont calculés sous le pied (à la position du capteur d'efforts) et que l'algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions utilise le centre de masse comme référence pour équilibrer la plate-forme.

Afin de prévenir que la plate-forme adhère aux points de contact (*i.e.* lorsque la commande oscille entre l'admittance et l'impédance), le torseur d'action \mathbf{h}_a est ajouté à la sortie de la commande hybride avec un gain \mathbf{K}_h . Ce gain, ainsi que les deux filtres cartésiens (G_{ch} et G_{cp}) doivent considérer la géométrie du mécanisme et les critères de stabilité. Dans un mécanisme entraîné par des câbles, une géométrie anisotrope pourrait être développée et l'asservissement nécessiterait plus d'énergie dans certains DDL pour obtenir la même transparence. Il faut aussi noter que les conditions initiales des intégrateurs et des filtres à l'intérieur de \mathbf{G}_{ch} et de \mathbf{G}_{cp} doivent être ajustées pour éviter des fuites d'énergie ou des instabilités. En outre, dans certaines circonstances, les incertitudes sur la cinématique et la dynamique doivent être considérées dans une commande hybride comme [197] le propose.

La sélection entre les classes de la commande est réalisée avec la matrice diagonale $\mathbf{S}_c \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ (1 ou 0 sur la diagonale tandis que les autres valeurs sont à 0) et est évaluée dans la référence des points de contact G_c . Les valeurs sur la diagonale de cette matrice \mathbf{S}_c dépendent de la simulation de la friction, de la géométrie des points de contact, et des résultats expérimentaux qu'on veut obtenir. Une seconde matrice de sélection, $\mathbf{\Pi}_o$, définie dans l'équation (7.19), est utilisée pour calculer les forces à chaque point de contact en sélectionnant les DDL soumis à la contrainte avec l'algorithme du problème de l'optimisation des forces défini à la section 7.4.2 :

$$\mathbf{\Pi}_o = \mathbf{Q}_o \mathbf{Q}_g \mathbf{S}_o \mathbf{Q}_g^T \mathbf{Q}_o^T \quad (7.19)$$

Donc un 0 sur la diagonale de $\mathbf{S}_o \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ permet une commande en force nulle en

fournissant une composante nulle dans le torseur évalué dans le repère G_c . Ces deux matrices de sélection (S_c et S_o) sont donc assez similaires dans la fonction, mais pas identiques.

7.3 Définition de la géométrie des points de contact

Comme la stratégie de commande exploite deux moteurs physiques (le moteur Newton et le moteur RAH personnalisé), chaque moteur peut asservir un DDL donné de la plate-forme en admittance ou en impédance simultanément. Les propriétés des objets virtuels et la géométrie des points de contact sont les critères qui déterminent la classe de la commande appropriée en utilisant la matrice de sélection Π satisfaisant les propriétés suivantes :

- lors d'une collision entre le modèle du pied virtuel et un objet virtuel rigide, pour lequel un modèle de friction est implanté, la sélection pourrait être déterminée en fonction de la géométrie des points de contact ;
- afin de simuler la friction, la commande en impédance avec un retour d'effort pourrait être choisi puisqu'il y a une force tangente aux points de contact réagissant à un torseur appliqué par l'utilisateur ;
- lors d'une collision avec un objet mou, la commande en impédance dans tous les DDL pourrait être choisi et
- lors d'un mouvement de la plate-forme dans un espace sans contraintes, la commande pourrait être en torseur nul, un cas spécial d'une commande en impédance lorsque certaines composantes de \mathbf{h}_r sont égales à 0.

Afin de sélectionner la classe de la commande donnée, la méthode favorisée dans le texte qui suit est l'approche par la géométrie des points de contact (selon la figure 7.6) qui met l'accent sur l'asservissement des avantages liés à la simulation d'objets virtuels rigides comportant un modèle de friction. Les points de contact sont calculés comme un ensemble minimal de points qui définissent complètement le contour de l'intersection entre le modèle du pied virtuel et un objet virtuel donné. Ces points sont représentés dans le moteur Newton, en liaison avec un ensemble de vecteurs normaux. Par exemple, pour une plate-forme haptique dédiée à un pied, un ensemble de points dont les distances relatives sont dans les dix millimètres peut être considéré par les algorithmes de

l'asservissement en un seul point.

Une telle stratégie nécessite comme entrée la direction du torseur appliqué pour chaque pied : si une composante du torseur mesuré \mathbf{h}_a est dans la même direction que le vecteur normal décrivant la géométrie des points de contact, ce qui signifie que l'utilisateur pousse sur l'objet virtuel, cette direction devrait donc être contrainte par la commande en admittance pour les objets infiniment rigides ; autrement, soit une commande en torseur nul est sélectionné pour simuler un mouvement libre dans l'espace ou soit une commande en impédance est employée pour simuler de la friction. Dans le cas d'un objet virtuel mou, la commande en impédance est préférée dans la direction normale à la géométrie des points de contact. Dans la figure 7.6, le vecteur normal décrivant cette géométrie est parallèle à l'axe z_c .

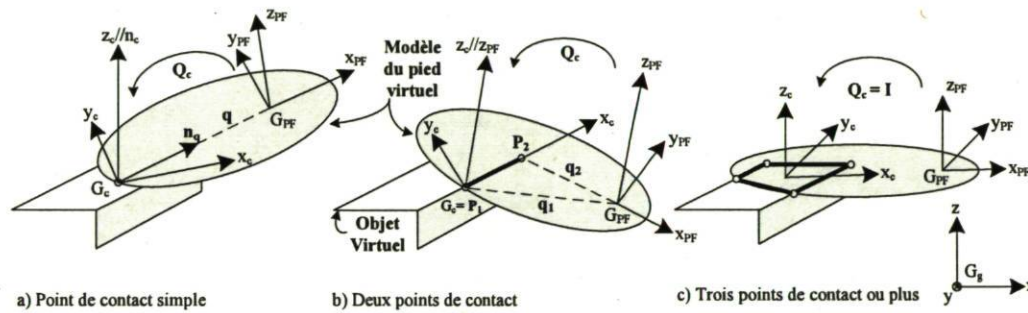


Figure 7.6: Description des points de contact pour les trois cas

La théorie qui est présentée plus bas s'applique uniquement pour les objets dont la déformation est relativement faible. Lorsque la déformation est non-linéaire, d'autres méthodes de calcul doivent être utilisées. Dans le cas particulier d'une déformation linéaire, il existe trois possibilités pour lesquelles les contraintes doivent être évaluées : le cas d'un contact simple (section 7.3.1), le cas pour deux points de contact (section 7.3.2), et le cas de trois contacts ou plus (section 7.3.3) lorsque le torseur \mathbf{h}_a est dans la même direction que le vecteur normal décrivant la géométrie des points de contact.

7.3.1 Point de contact unique

La présence d'un point de contact simple est un cas particulier où l'algorithme de détection des contacts du moteur physique ne trouve que des points qui sont tous situés à l'intérieur d'une distance minimale et ne génèrent donc pas suffisamment d'action de soutien pour les DDL de la plate-forme qui, autrement, auraient été contraints. Par conséquent, ce cas contraint la plate-forme dans la direction du vecteur normal \mathbf{n}_c défini par le plan tangent de la surface, en supposant que les vecteurs de friction se situent dans ce plan ; les autres directions sont laissées sans contrainte, *i.e.* libres de se déplacer, comme le montre la figure 7.6a). Par conséquent, $\mathbf{S}_c[2][2]$ est fixé à un et toutes les autres valeurs sont mises à zéro, puisque l'axe z_c est fixé dans la direction normale au point de contact.

Il est à noter que la détermination de la matrice de rotation \mathbf{Q}_c est difficile à obtenir puisque seulement un axe (l'axe z_c) est défini. Une autre manière de calculer la force dans le repère G_c est, en premier, de calculer \mathbf{n}_c , \mathbf{h}_a et \mathbf{q} dans le repère global G_g , et, par la suite, de trouver la projection de \mathbf{h}_a conformément à l'équation (7.20) au lieu d'utiliser le problème d'optimisation des forces (il n'y a pas de force à optimiser sur un point de contact et \mathbf{Q}_c est inconnue) :

$$\begin{aligned} \text{si } (\mathbf{q}^T \mathbf{h}_a[0 : 2] \geq 0) \Rightarrow \Gamma_a &= \mathbf{n}_q (\mathbf{n}_q^T \mathbf{h}_a[0 : 2]) + \\ &\quad \text{skew}(\mathbf{q})^{-I} \mathbf{h}_a[3 : 5] \\ \text{si-non } \Gamma_a &= \mathbf{0}_{3 \times 1}, \text{ avec} \end{aligned} \tag{7.20}$$

$$\mathbf{n}_q = \mathbf{q} / \|\mathbf{q}\|, \tag{7.21}$$

où les opérateurs $[0 : 2]$ et $[3 : 5]$ sélectionnent la force et le moment respectivement et l'opérateur *skew* donne une matrice carrée *skew* symétrique. L'inverse de $\text{skew}(\mathbf{q})^{-I}$ est calculé avec la décomposition en valeurs singulières.

7.3.2 Double points de contact

Dans le cas de deux points de contact, la plate-forme a uniquement un DDL de libre, comme le montre la figure 7.6b). En effet, la rotation autour de l'axe x_c est contrainte en impédance (commande en torseur nul) pendant que les autres DDL peuvent être commandés en admittance pour un objet virtuel rigide. La matrice de rotation \mathbf{Q}_c est calculée avec l'axe z_c parallèle à l'axe z_{PF} et l'axe x_c est posé dans la direction de la ligne qui relie les deux points de contact⁸. Cette matrice de rotation est donc définie par l'équation (7.22) :

$$\mathbf{Q}_c = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ avec} \quad (7.22)$$

$$\text{si } (P_{2x} - P_{1x} \neq 0) \Rightarrow \phi = \arctan \frac{P_{2y} - P_{1y}}{P_{2x} - P_{1x}}, \quad (7.23)$$

$$\text{si-non } \phi = \pi/2. \quad (7.24)$$

La diagonale de la matrice de sélection \mathbf{S}_c est configurée de manière à ce que des mouvements linéaires le long des axes x_c et y_c avec des rotations autour de l'axe z_c puissent être commandés en impédance pour permettre la simulation de la friction. Aussi, cette diagonale est configurée pour que les mouvements linéaires suivant l'axe z_c et la rotation autour de l'axe y_c soient contraints en admittance pour un objet virtuel rigide. Seule la composante des rotations autour de l'axe x_c dans \mathbf{S}_o est mise à zéro alors que toutes les autres composantes de rotation sur la diagonale sont mises à un pour sélectionner la commande en impédance.

8. La modification de la commande hybride est donc uniquement due à la rotation dans le plan $x_c - y_c$ lorsqu'il y a de la friction. C'est la solution la plus facile, sinon il faut connaître la géométrie exacte de l'objet virtuel pour déterminer les deux plans qui forment l'axe x_c afin de fixer z_c comme étant la direction définie par l'angle moyen entre les deux plans. Habituellement, puisque ce sont des triangles, la définition du plan est difficile puisqu'il pourrait y avoir plusieurs triangles dans ce plan (au moins deux pour un rectangle).

7.3.3 Trois points de contact ou plus

Cette situation est simple puisque tous les DDL de la plate-forme sont contraints lorsque les composantes de \mathbf{h}_a poussent sur l'objet virtuel. Ainsi, la matrice de rotation \mathbf{Q}_c et la matrice de sélection \mathbf{S}_c deviennent des matrices identité (figure 7.6c)) et les composantes de la diagonale de \mathbf{S}_c sont mises à un à l'exception des deux composantes représentant le mouvement linéaire dans le plan x_c et y_c qui sont mises à zéro pour simuler la friction en utilisant la commande en impédance.

7.4 Rendu de l'affichage haptique (RAH)

Afin de simuler des objets mous avec des déformations linéaires, l'algorithme de détection des collisions dans le moteur Newton est employé conjointement avec un moteur physique personnalisé, nommé RAH, qui est basé sur le design de H3D [218] API et quelques algorithmes contenus dans ODE [219] optimisés pour l'approche multi-contact utilisée dans ce chapitre. Cette section décrit le RAH en détail de manière à être compatible avec l'interface de locomotion entraînée avec des câbles et avec la commande hybride décrite dans les sections précédentes.

Le RAH développé dans ce chapitre aurait pu être basé sur le système mathématique présenté par Boyd [220] combiné avec la définition de l'espace des contacts de Khatib [221]. La solution au problème d'optimisation des forces aux points de contact, présentée à la section 7.4.2, qui utilise un temps de calcul intensif, a été proposée et développée dans [196], [222] et [220]. Notre approche fait l'hypothèse qu'un objet est linéairement déformable en suivant un modèle d'impédance comme celui présenté dans [223]. Par conséquent, cette section présente les modifications nécessaires lorsqu'un capteur d'effort à six DDL est inclus dans le système afin d'obtenir le meilleur rendu haptique.

Le rendu de l'affichage des forces peut être réalisé par d'autres moteurs connus comme Chai3d⁹. Comme moteur secondaire, Newton Game Dynamics, inclus dans le gestionnaire de l'environnement virtuel, a été choisit parmi plusieurs autres pour fournir

9. <http://www.chai3d.org/>

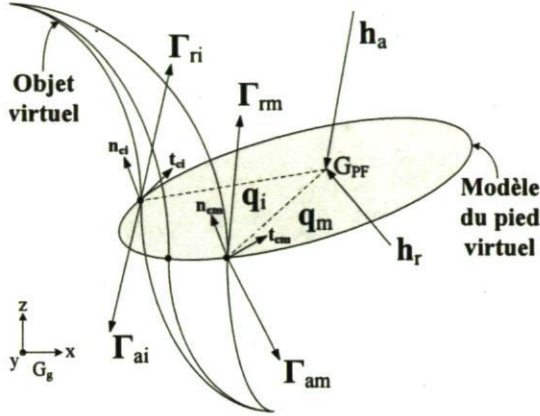


Figure 7.7: Modèle de la collision avec les torseurs et les forces impliqués

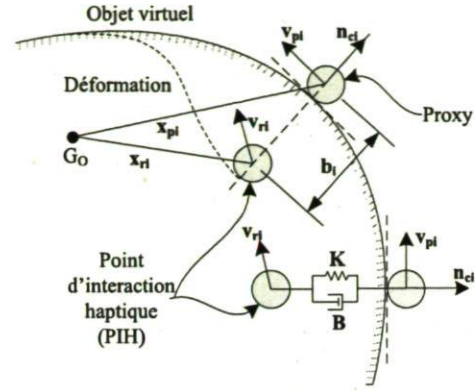


Figure 7.8: Modèle du proxy dynamique et de son point d'interaction haptique

le retour d'effort et les points de contact par l'algorithme de la détection des collisions.

7.4.1 Calcul du torseur de réaction

Le calcul du torseur de réaction \mathbf{h}_r emploie comme entrée le torseur d'action \mathbf{h}_a mesuré avec un capteur d'effort à six DDL. Il faut noter que \mathbf{h}_a est défini comme le torseur appliqué par le marcheur sur la plate-forme comme le montre la figure 7.7 et \mathbf{h}_r résulte du modèle d'impédance d'un objet virtuel et du modèle de la friction calculée par l'équation (7.25) :

$$\mathbf{h}_r = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{m-1} \mathbf{Q}\mathbf{\Gamma}_{r_i} \\ \sum_{i=0}^{m-1} (\mathbf{q}_i \times (\mathbf{Q}\mathbf{\Gamma}_{r_i})) \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

où $\mathbf{\Gamma}_{r_i} \in \mathbb{R}^3$ est la force de réaction au i ème point de contact $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^3$. Bien que l'algorithme présenté dans ce chapitre puisse prendre en compte un nombre arbitraire de points de contact m , les résultats lors de la démonstration utilisent uniquement quatre points, pour la représentation visuelle, autour de chaque prisme rectangulaire qui sert de rectangle englobant.

Pendant une collision, chaque point de contact doit satisfaire quatre contraintes, qui sont définies de la même manière que celles présentées dans [196] :

- Γ_{r_i} peut permettre une pénétration entre le modèle du pied virtuel et l'objet virtuel ;
- Γ_{r_i} peut pousser mais ne peut pas tirer (il n'y a pas de colle qui adhère à la surface) ;
- Γ_{r_i} se produit uniquement au points de contact définis par un rectangle englobant le pied virtuel¹⁰, et
- il n'y a pas de moment à un seul point \mathbf{q}_i ; le moment de réaction appliqué sur le modèle du pied virtuel est calculé avec $\mathbf{q}_i \times \Gamma_{r_i}$ comme dans l'équation (7.25).

Les forces de réaction Γ_{r_i} sont composées des forces de friction Γ_{f_i} décrites par le modèle de la loi de Coulomb (equation (7.29) sous les contraintes (7.28)), le modèle d'impédance Γ_{I_i} (équation (7.27)), et une force donnée Γ_{M_i} dont le but est de veiller à ce que la conservation de la quantité de mouvement soit respectée avec un coefficient de restitution désiré (qui n'est pas présenté dans ce chapitre) :

$$\Gamma_{r_i} = \Gamma_{I_i} + \Gamma_{f_i} + \Gamma_{M_i}, \text{ avec} \quad (7.26)$$

$$\Gamma_{I_i} = \mathbf{A}_i \ddot{\mathbf{b}}_i + \mathbf{B}_i \dot{\mathbf{b}}_i + \mathbf{K}_i \mathbf{b}_i, \quad (7.27)$$

$$\text{si } (\mu_c \mathbf{n}_{ci}^T \Gamma_{a_i} \leq \|(\mathbf{I} - \mathbf{n}_{ci} \mathbf{n}_{ci}^T) \Gamma_{a_i}\|) \Rightarrow \quad (7.28)$$

$$\Gamma_{f_i} = (-\mu_c \mathbf{n}_{ci}^T \Gamma_{a_i}) \mathbf{t}_{ci} \quad (7.29)$$

$$\text{si-non} \quad \Gamma_{f_i} = -(\mathbf{I} - \mathbf{n}_{ci} \mathbf{n}_{ci}^T) \Gamma_{a_i},$$

où \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i et \mathbf{K}_i sont respectivement la matrice d'inertie de l'objet virtuel couplée au pied, la matrice d'amortissement et la matrice de la raideur données pour une pénétration \mathbf{b}_i (voir figure 7.8), dans le cas d'une petite déformation et pour des déformations élastiques linéaires, puisque le modèle fait l'hypothèse d'une absence de couplage entre chaque point de contact. μ_c est le coefficient de friction dynamique, alors que \mathbf{n}_{ci} et \mathbf{t}_{ci} sont les vecteurs normal et tangentiel à l'interface des points de contact entre les deux objets (calculés avec l'aide du moteur Newton et du proxy dynamique de la figure 7.8).

10. En anglais : *virtual foot model bounding box*

7.4.2 Problème d'optimisation des forces (POF)

Cette section présente la méthodologie pour calculer les forces d'action Γ_{a_i} à chaque point de contact sous une contrainte d'un cône de friction en utilisant un algorithme qui résout le problème de l'optimisation des forces (POF). Le torseur d'action est mesuré par rapport au repère mobile de la plate-forme G_{PF} situé à la position du capteur d'effort. Il doit maintenant être transféré à chaque point de contact calculé afin d'obtenir la représentation virtuelle des forces appliquées. Puisqu'aucun modèle qui représente la répartition de la force sous le pied n'est utilisé, le torseur d'action est simplement distribué uniformément et optimalement, comme le suggère Duriez [224]. Il est intéressant de noter que cette répartition devrait être évaluée par un capteur de distribution ¹¹ [225], cependant un tel capteur n'a pas été encore développé dans ce travail.

Le POF implique deux contraintes : la contrainte d'équilibre et la contrainte du cône de friction (similaire à ce que Melder propose [226]). Le premier type de contrainte est défini par un ensemble d'équations linéaires m (7.30), avec les matrices de contact $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{6 \times 3m}$ étant définies par l'équation (7.31), où $\Gamma_{a_i} \in \mathbb{R}^3$ est la i ème force optimale utilisée pour construire le vecteur $\Gamma_a = [\Gamma_{a_0} \dots \Gamma_{a_{m-1}}]^T \in \mathbb{R}^{3m}$:

$$\Pi_o \mathbf{h}_a = \Pi_o \mathbf{R} \Gamma_a \text{ avec,} \quad (7.30)$$

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_0 \dots \mathbf{R}_{m-1}], \quad (7.31)$$

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{q}_i \times \mathbf{Q} \end{bmatrix}. \quad (7.32)$$

La contrainte du cône de friction est utilisée pour définir la valeur du seuil de la force de friction à laquelle les transitions du pied entre le glissement et l'adhérence sur une surface se produisent. Le POF tente alors de calculer les forces optimales lorsque le modèle du pied virtuel adhère à la surface, et fait l'hypothèse d'un glissement quand aucune solution ne peut être trouvée. Évidemment, la formulation du POF peut-être implantée en utilisant la programmation quadratique avec des contraintes non-linéaires comme le représente l'équation (7.33) pour tout $m \in N^+$:

11. En anglais : *walkway sensor*

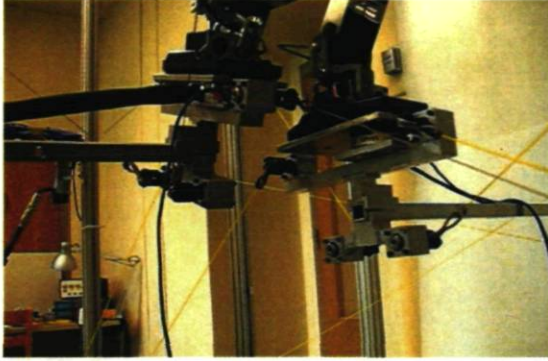


Figure 7.9: Les pieds du Kondo KHR-1HV et le capteur d'efforts (\mathbf{h}_a) sur la version réduite de NELI

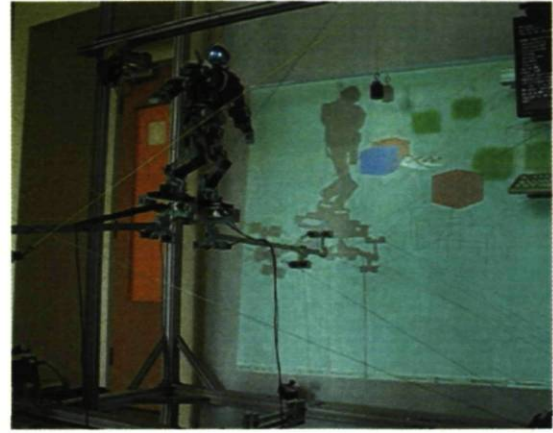


Figure 7.10: Version en modèle réduit de NELI avec l'écran de l'environnement virtuel

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser} \quad \frac{1}{2} \Gamma_a^T \mathbf{H} \Gamma_a \\ \text{sous} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Pi_o \mathbf{h}_a = \Pi_o \mathbf{R} \Gamma_a \\ \frac{-\Gamma_{a_i}^T \mathbf{n}_{ci}}{\|\Gamma_{a_i}\|} \geq \cos \alpha_i \\ \text{Si sans solution, essaie avec} \\ \mu_c \mathbf{n}_{ci}^T \Gamma_{a_i} \leq \|(\mathbf{I} - \mathbf{n}_{ci} \mathbf{n}_{ci}^T) \Gamma_{a_i}\| \end{array} \right. \\ i = 0 \dots m-1 \\ \tan \alpha_i = \mu_s \\ H = \text{diag}(h_i). \end{array} \right. \quad (7.33)$$

où \mathbf{H} est la matrice de poids avec $h_i = 1$ qui pourrait représenter la répartition de la force sous le pied (non utilisée pour ce travail) et μ_s est le coefficient de friction statique.

7.4.3 Résultats du POF

Cette section présente les résultats obtenus à partir du RAH et la stratégie de la commande hybride. Pour ces démonstrations, uniquement quatre points sont employés aux quatre sommets du prisme rectangulaire représentant le rectangle englobant du modèle du pied virtuel comme le montre le clip vidéo présenté à la section A.1.1.6. Il est à noter que le nombre de points de contact doit être choisi de manière à tenir

compte de la durée maximale autorisée de la bande passante de la télécommunication entre le gestionnaire de l'environnement virtuel et le gestionnaire de l'asservissement.

Comme pour le chapitre précédent, les paramètres des prochaines simulations proviennent des trajectoires d'une marche normale échantillonnées à 100 Hz [31]. Les figures 7.9 et 7.10 montrent la version réduite actuelle de l'interface de locomotion entraînée par des câbles avec un Kondo KHR-1HV. Ces deux figures proviennent du clip vidéo présenté à l'annexe A.1.1.7. D'un autre côté, la stratégie de la commande hybride est présentée dans le clip vidéo à l'annexe A.1.1.5.

Les forces générées à chaque point de contact résultent de la géométrie sous le modèle du pied virtuel et de l'amplitude du torseur d'action, ce qui explique en partie pourquoi l'augmentation du nombre de points de contact améliore (ou réduit) les discontinuités des forces qui se produisent lors de l'apparition et la disparition d'un point de contact. La figure 7.11 montre ces discontinuités pour la trajectoire du pied droit qui est sujet à l'équation (7.26). Les tentatives visant à éliminer ces discontinuités *a posteriori* est lourde et probablement inutile puisqu'elles seront atténuées ou éliminées lors d'une augmentation de la complexité du modèle du pied, de ce fait, résultant en une distribution des contacts qui représente mieux la réalité. Cependant, les discontinuités dans le torseur \mathbf{h}_o sont toujours interdites car elles peuvent potentiellement générer des discontinuités de tension dans un câble lors de l'utilisation de l'algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions (ODT). Lorsque de telles discontinuités se produisent, l'asservissement articulaire ne peut pas suivre la consigne, et le torseur résultant sur la plate-forme ne sera pas équilibré. D'autres problèmes de stabilités provenant intrinsèquement de la commande hybride sont présentés dans [227]. Ces problèmes doivent être considérés bien que ce chapitre n'aborde pas les solutions proposées.

Il est à noter que la présence de seulement quatre points de contact par modèle du pied virtuel est avantageuse pour la représentation visuelle de la distribution des forces, comme le montre la figure 7.14, qui représente les cadres de la séquence vidéo extraite de la simulation des algorithmes RAH et POF pour un cycle de marche.

Si une force de réaction est appliquée à la plate-forme haptique pendant une commande en impédance ou en admittance, le torseur d'action \mathbf{h}_a mesuré sous le pied est employé par l'algorithme du POF pour calculer les forces à chaque point de contact.

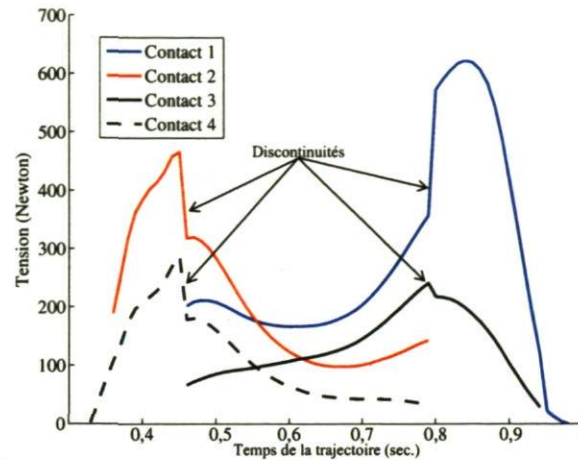


Figure 7.11: Somme des forces de réactions normalisée $\|\Gamma_{ri}\|$ à chaque point de contact

Les conditions représentées par le cône de friction sont dessinées dans la figure 7.12, et implique que quelques points de contact glissent sur la surface lorsque la force descend sous $\cos \alpha_i$. Ceci indique ainsi que la force de frottement, montrée à la figure 7.13, doit être ajoutée comme une force de réaction à ces points.

7.5 Impacts dynamiques élevés

Les solutions présentées dans ce chapitre (RAH avec le POF), ont été développées pour le rendu haptique de la sensation kinesthésique qui est essentiellement une sensation musculaire. Cependant, lorsque les objets ont une vitesse initiale importante avec un impact, la solution proposée ne sera tout simplement pas adéquate. Il sera nécessaire d'ajouter un simulateur d'impact, soit par l'ajout d'un mécanisme supplémentaire, ou soit pas l'ajout de la programmation d'une trajectoire après l'impact. L'objectif sera alors de stimuler les mécanorécepteurs de la peau. Cette tâche sera difficile puisque le mécanisme actuel ne répond pas à des fréquences supérieures à 30 Hz lorsque la longueur du câble est nulle. Il faut aussi s'assurer que toutes les vibrations induites dans les câbles puissent être équilibrées à la plate-forme par l'algorithme de l'optimisation de la distribution des tensions dans les câbles. Un générateur d'impact à l'intérieur de l'enrouleur avec deux moteurs a été proposé dans [228]. Ce générateur permet d'induire des vibrations à la plate-forme similaires aux vibrations produites lors d'un impact avec le Delrin, mais aucune étude sur l'équilibrage et l'asservissement de ces vibrations n'a

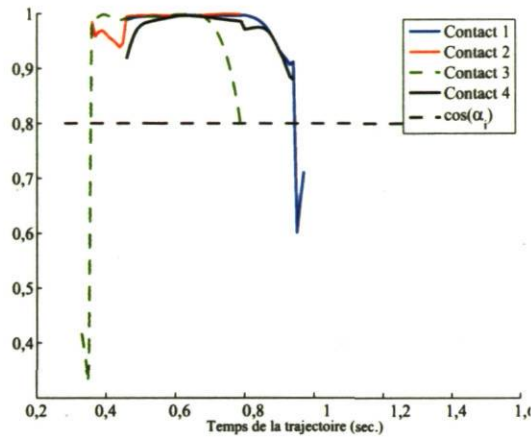
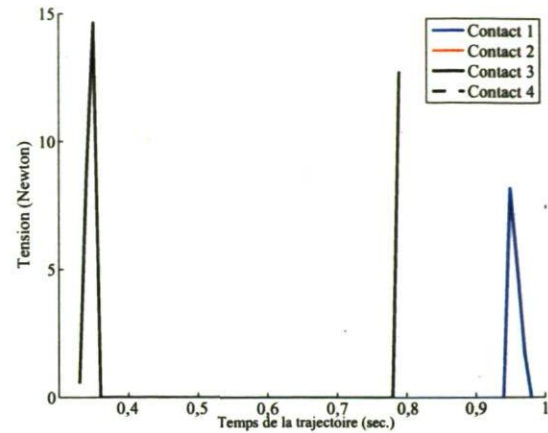


Figure 7.12: Condition du cône de friction

Figure 7.13: Norme de la force de friction $\|\Gamma_{fi}\|$ comme une composante de la force de réaction

été proposée.

7.6 Conclusion

NELI exploite des architectures logicielle et matérielle qui ont été spécifiquement conçues pour gérer adéquatement un mécanisme entraîné par des câbles qui est actionné par un moteur physique de rendu haptique temps-réel mise en oeuvre dans le système d'exploitation QNX. L'architecture logicielle inclut une commande hybride en impédance et en admittance et deux moteurs physiques dont un spécialement développé qui assure le meilleur rendu haptique pour des objets autant rigide que mou. L'utilité du moteur Newton est de déterminer les points de contact et de les transmettre par un canal de communication au deuxième moteur physique qui contient le RAH et le POF. Les points de contact sélectionnés permettent de déterminer les contraintes sur les DDL de la plate-forme alors que le moteur physique sous QNX effectue les calculs des rendus d'impédance et d'admittance. Cette stratégie assure qu'un rendu haptique temps-réel soit effectué même si un retard important se produit sur le canal de communication. Elle ne résout pas tous les problèmes de stabilité dus aux retards variables, lors du rafraîchissement des données qui permettent de sélectionner les DDL contraints de la plate-forme, mais elle assure un rendu minimal des propriétés physiques des objets virtuels. Ces composantes ont été implémentées et généralisées suivant un paradigme des

architectures ouvertes afin de faciliter les développements futurs et les améliorations du moteur physique.

Le noyau de la sélection de la classe de la commande du mécanisme est basé sur deux matrices de sélection qui dépendent de la géométrie des points de contact et des propriétés physiques de l'objet virtuel. Un tel processus sélectionne une classe de la commande particulière pour chaque DDL de la plate-forme haptique, en fonction du type de collision et des conditions de friction. Le POF (problème d'optimisation des forces) nécessite donc d'être résolu sous cette géométrie spatiale, avec une contrainte sur le modèle de la loi de Coulomb qui par conséquent peut être calculé en utilisant la programmation quadratique.

7.7 Travaux futurs

Le modèle actuel pour la simulation des objets virtuels mous est encore sous développement puisque le couplage entre chaque point de contact est actuellement négligé et l'équation (7.26) est uniquement valide pour de petites déformations élastiques linéaires. De plus, il est possible d'étendre le modèle de la friction avec des algorithmes plus complexes afin de considérer les non-linéarités comme la loi de Signorini implantée dans [229, 224] et aussi comme l'effet de Stribeck. Finalement, les objets complètement déformables comme le sable ou même l'eau peuvent être modélisés par des modèles chaînés [230] où chaque molécule (ou atome) possède une loi d'attraction. La généralisation d'objet déformable (mais non scindable), peut-être fournie par les deux modèles tels que le neo-Hookean et les solides de Mooney-Rivlin [231]. Un effort intéressant a aussi été réalisé par Spillmann [232] pour calculer de manière non itérative les forces de contact pour les objets déformables. Cette approche, très rapide en temps de calcul, combine les bénéfices des méthodes de pénalités et de contraintes : les équations peuvent être découplées et être résolues analytiquement.

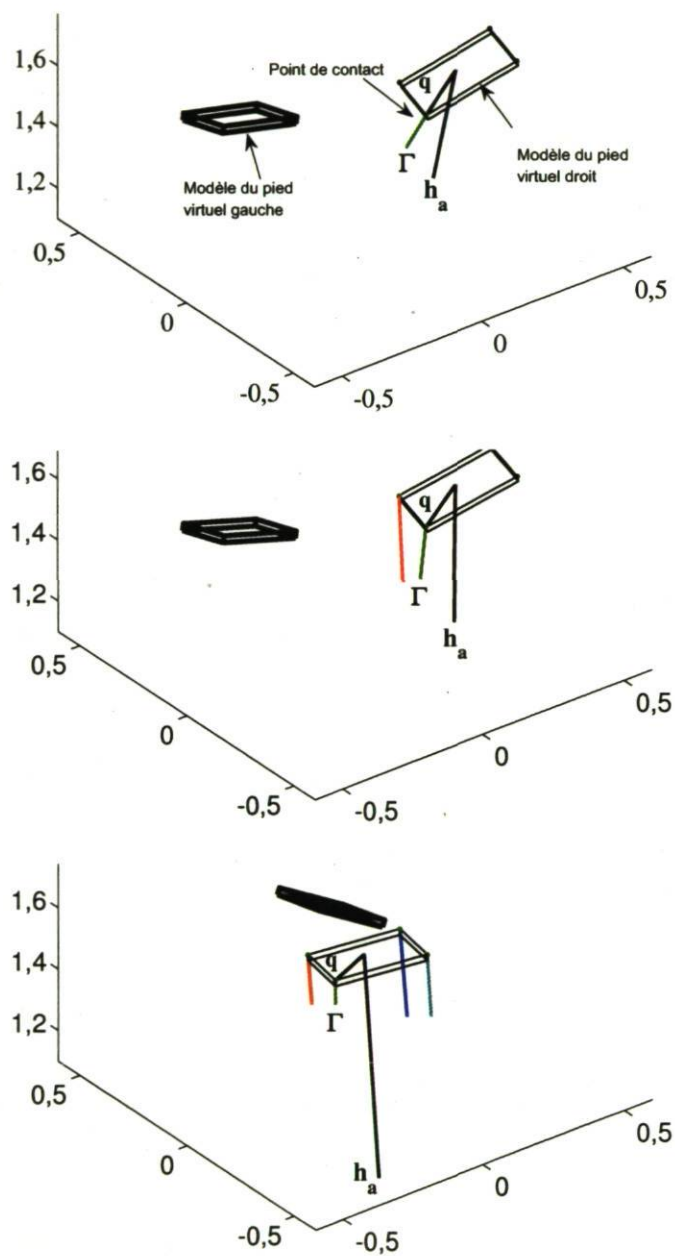


Figure 7.14: Séquence vidéo de la simulation de la marche pour quatre points de contact

Chapitre 8

Travaux futurs

Ce chapitre traite des avenues qui restent à développer et à étudier pour compléter une interface de locomotion complètement fonctionnelle. Les travaux présentés dans ce chapitre ne font pas partie des contributions de la thèse mais demeurent des enjeux majeurs à la réussite de la version complète et finale de l'interface de locomotion.

Ce chapitre présente quelques aspects critiques qu'une interface de locomotion doit considérer. Les deux premiers aspects sont interreliés : le harnais et le rappel. Dans le premier cas, il est nécessaire de considérer des aspects de sécurité qui protègent l'utilisateur. Que ce soit un harnais passif ou actif, il est nécessaire de déterminer un mécanisme qui aide l'utilisateur à conserver son équilibre. Dans le deuxième cas, le rappel de l'utilisateur dans le centre de l'interface de locomotion doit être étudié de manière à ce qu'il puisse être intégré à la commande haptique hybride. Le problème majeur sera donc d'étudier l'effet du rappel dans le cas où une commande en impédance est sélectionnée. Finalement, dans la dernière section, un aspect qui n'a pas encore été traité est exploré : la communication inter-utilisateur sur un réseau Internet.

8.1 Harnais actif

Le harnais est très complexe à réaliser tant au niveau du design mécanique qu'au niveau de l'architecture logicielle de l'asservissement. Le harnais est considéré comme un élément à très haut risque pour la finalité des travaux de recherche. Les raisons sont nombreuses puisque l'asservissement du harnais doit inclure :

- la gestion des interférences entre les câbles des plates-formes et les câbles du harnais ;
- une interaction avec l'algorithme de rappel, soit le mouvement du plancher virtuel ;
- des éléments de sécurité dont la prévention des chutes dues à des pertes d'équilibre et
- une simulation des paramètres physiques dont les accélérations.

Dans cette thèse, un harnais passif avec deux câbles a été proposé pour réduire la masse du robot marcheur Kondo KHR-1HV puisque le système d'acquisition et d'amplification n'a tout simplement pas suffisamment de périphériques d'entrées/sorties pour commander des enrouleurs supplémentaires.

Poulin [3] a déterminé l'espace de travail minimum avec le seuil de perception en accélération utilisé dans l'algorithme de rappel. Ces limites de perception sont largement utilisées lors de la conception de simulateurs de vol pour les avions [233]. Cependant,

avec l'ajout d'un harnais dorsal qui relie l'IL au centre de masse de l'utilisateur, il serait possible de dépasser les seuils de perception en imposant différentes forces asservies avec le harnais [49]. Pour cette raison, l'espace calculé pourrait être diminué.

8.2 Algorithme de rappel

L'algorithme de rappel agissant comme un régulateur, à l'intérieur du *générateur de couple virtuel*¹ (une section du RAH²), a deux fonctionnalités : 1) conserver l'utilisateur au centre de l'interface de locomotion et 2) gérer adéquatement les dynamiques supérieures à celles permises par la mécanique de l'interface de locomotion. L'idée de ces deux fonctionnalités provient d'un simulateur de vol où les accélérations et les décélérations seules sont simulées. En effet, pour l'utilisateur, seules les accélérations et les décélérations sont perçues, soit au maximum pendant quelques secondes lors d'une marche, d'une ascension ou d'une chute. L'objectif sera alors de simuler par l'algorithme de rappel une fraction de l'accélération pendant une fraction de seconde comme pour un simulateur de vol tout en évitant que l'utilisateur (ou que les plates-formes) quitte l'espace de travail. L'ajout de cet algorithme dans le procédé est présenté dans la figure 8.1.

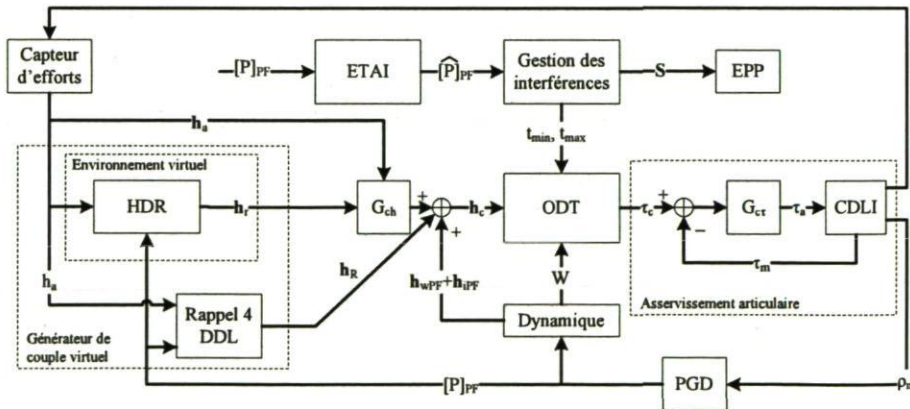


Figure 8.1: Processus de l'algorithme du servocontrôleur simplifié avec un algorithme de rappel

1. Ce nom a été conservé selon l'idée originale décrite dans le mémoire de Poulin [3]
2. Rendu de l'affichage haptique. En anglais : *Haptic Display Rendering*

Un algorithme supplémentaire peut être ajouté au moment où le gradient du rappel tend vers 0 : la gravité est appliquée sur la scène plutôt que sur l'utilisateur. Le résultat doit être identique à celui du calcul d'un vecteur de translation par l'algorithme de rappel. Cet algorithme est réalisé par le servocontrôleur de NELI pour tenir compte des limites mécaniques de l'interface de locomotion.

Lors de l'atterrissage de l'utilisateur sur le sol, les contacts sont générés (détectés par l'algorithme de détection des contacts du moteur de Newton) et sont envoyés au *générateur de couple virtuel*, l'utilisateur sera alors poussé vers le haut par les forces générées par le contact pour ressentir la collision (la physique gère naturellement le problème de la sensation d'atterrir sur une surface) ; à ce moment l'algorithme de rappel entre en jeu pour faire revenir l'utilisateur dans le centre mécanique de l'interface de locomotion. Les forces seront limitées pour générer les accélérations jugées maximales pour éviter de blesser l'utilisateur selon des spécifications fonctionnelles sécuritaires. Au moment où l'utilisateur sera à la limite supérieure de l'espace de travail mécanique (ou simplement lorsque le gradient du rappel tend vers 0), la gravité est remise en mode normal suite à un message envoyé au HSM par l'algorithme de rappel. Essentiellement, la commande est réalisée d'une manière hybride en impédance et en admittance lors d'un contact d'un objet rigide ou élastique.

En résumé, à un certain seuil où la dynamique imposée par la simulation dépasse les capacités mécaniques de l'interface de locomotion, la scène se déplace à la dynamique voulue sans que l'utilisateur ait à se déplacer à cette dynamique. Ainsi, l'algorithme de rappel gère l'ensemble des déplacements : la scène suit le vecteur de translation calculé par l'algorithme de rappel ou se déplace selon la gravité pour gérer les chutes. Il n'y a donc pas de synchronisation particulière entre le servocontrôleur de NELI (contenu dans le gestionnaire de l'asservissement) et le gestionnaire de l'environnement virtuel (GEV).

8.2.1 Algorithme et comportement du rappel dans un DDL

En temps continu, la fonction de transfert typique d'un filtre de rappel est présentée par l'équation 8.1. Dans ce cas, ζ est la constante de temps du filtre qui peut être négative ou positive. Ce paramètre est difficile à fixer et il peut être traité comme

incertain dans une commande adaptative [234]. Le principal bénéfice de ce type de filtre est que tous les points d'équilibre en boucle ouverte sont préservés. Cependant, lorsque le système est stabilisé autour du point d'opération, il a tendance à provoquer une dérive autour de ce point. Cette limitation peut être résolue par l'utilisation d'un filtre instable (avec ζ négatif) [186]. La paramétrisation de ce filtre influence directement l'espace de travail. En outre, il existe au moins deux algorithmes pour ajuster les paramètres du filtre. Le premier étudie l'ajustement des paramètres pour optimiser les performances. Le second est orienté sur la gestion de l'espace de travail [235].

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{s}{s + \zeta}. \quad (8.1)$$

Contrairement aux algorithmes de rappel proposés dans la littérature, où l'asservissement est effectué directement sur les actionneurs, la solution la plus simple est de réaliser un rappel sur l'origine de monde virtuel O_{MV} (voir la figure 8.4). L'origine du MV est représentée par la position de l'origine du repère du MV, soit P_{MV} . De cette manière, l'algorithme sera identique à celui utilisé pour un tapis roulant dans le sens où le tapis est remplacé par le sol du MV. Une autre différence consiste au fait qu'il n'y a aucun modèle dynamique associé à un véhicule comme un avion ou une motocyclette. Dans le cas d'une IL, la commande de l'humain et la démarche produite conduisent directement les deux plates-formes dans le monde réel et virtuel. Ces deux différences réduisent la complexité du filtre.

Le vecteur de rappel v_w qui déplace O_{MV} (ou P_{MV}) est appliqué sur l'effecteur du harnais, soit le centre de masse de l'utilisateur P_{cmu} . La vitesse du sol virtuel sous les pieds ramène donc l'utilisateur vers le centre de l'IL P_{IL} . Pour cette opération, il faut un asservissement dans les trois axes (x, y, z) pour la simulation de pentes et d'escaliers. Iwata [34] propose d'utiliser le point milieu entre les genoux pour calculer la distance entre l'utilisateur et le centre du tapis roulant Torus comme le montre la figure 8.5, alors que dans le cas de cette étude, le point milieu entre les deux plates-formes est préféré. Il propose aussi l'utilisation d'une zone dite morte, où le rappel est soit très lent ou inexistant, pour que l'utilisateur ressente l'accélération ou la décélération lors d'un changement de la démarche. Considérant le mécanisme utilisé, il est plus simple d'utiliser le point milieu P_G entre les deux origines des plates-formes P_{opf_g} et P_{opf_d} . De plus, en ce qui concerne l'orientation de l'utilisateur, la même technique peut être utilisée. Le sol

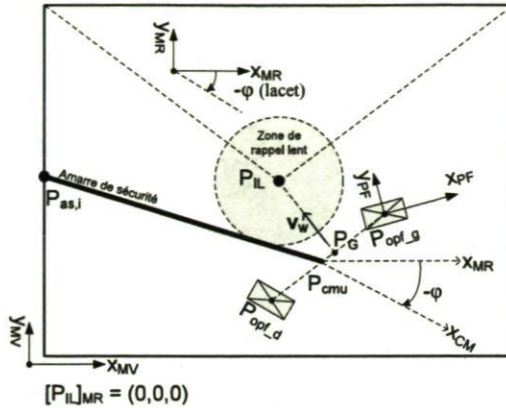


Figure 8.4: Paramètres pour l'algorithme de rappel et du harnais

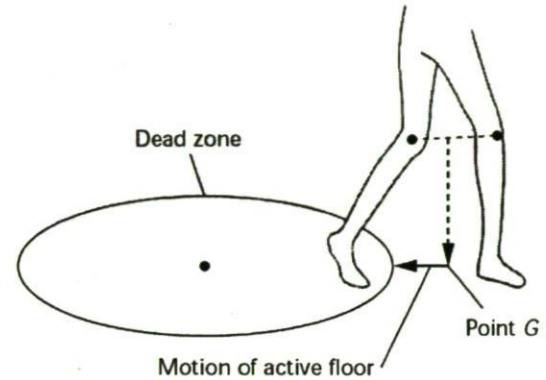


Figure 8.5: Conservation du point G dans une zone morte [34]

virtuel peut suivre une rotation en fonction des orientations des plates-formes tel que proposé par Noma (voir figure 2.9) [16]. Cette rotation est réalisée uniquement autour de l'axe des z , soit par le lacet ϕ .

Pour déterminer la loi de commande du paramètre du filtre, la gestion de l'espace de travail est choisie. Les raisons qui motivent ce choix concernent des aspects de sécurité de l'utilisateur et le temps de calcul. En effet, il n'est pas possible d'asservir correctement les plates-formes lorsque celles-ci sortent de l'espace de travail. En ce qui concerne le temps de calcul, il ne sera pas possible d'implanter une solution itérative. Une approximation de la loi de commande peut être réalisée simplement avec un polynôme, ce qui est beaucoup plus rapide.

La conception du filtre est présentée pour un axe seulement puisque des résultats similaires sont valides pour les autres axes. La structure du filtre est présentée à la figure 8.6. Pour l'axe des abscisses, l'espace est de deux mètres, soit un mètre en avant et un mètre en arrière de l'usager.

Les paramètres de marche, pour valider l'algorithme, sont simulés pour des vitesses de 1.5 et de 10.5 km/h comme le montre la figure 8.7. La forme de la courbe de la vitesse est donnée par la dérivée de l'équation 3.1, présentée dans la section 3.2.3. Le déplacement résultant dans le monde virtuel est montré à la figure 8.8.

La nécessité d'utiliser un filtre adaptatif est prouvée en fixant ζ . Le résultat est

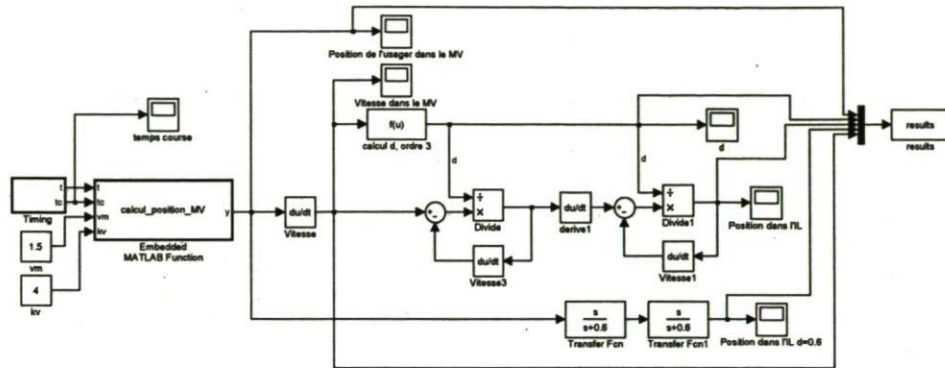


Figure 8.6: Structure de l'algorithme de rappel dans *Simulink*

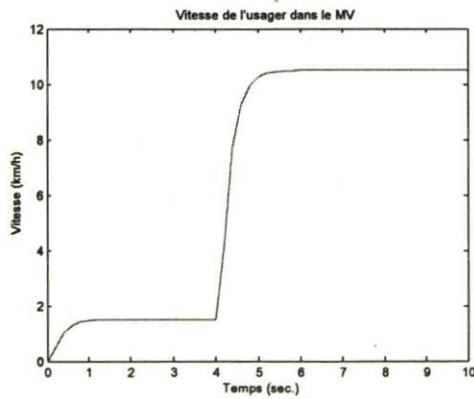


Figure 8.7: Vitesse de l'utilisateur dans le MV

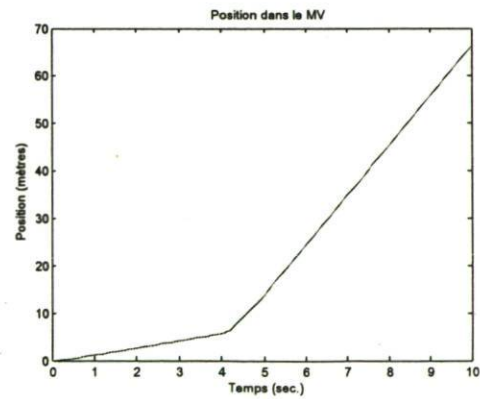


Figure 8.8: Position de l'utilisateur dans le MV

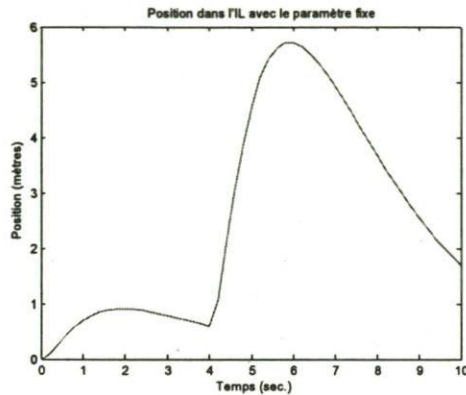


Figure 8.9: Rappel avec un ζ fixe dans le temps à 0,6

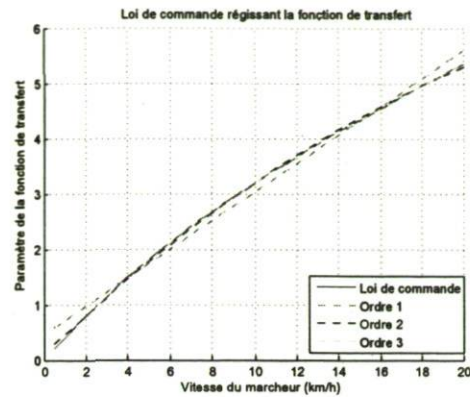


Figure 8.10: Loi de commande du filtre de rappel approximative selon l'ordre du polynôme

présenté à la figure 8.9 pour un ζ de 0,6. Le graphique montre qu'à $1,5\text{ km/h}$, le rappel fonctionne bien, mais dès que l'utilisateur commence à courir, il sort de l'espace de travail.

Les paramètres qui permettent de trouver ζ sont la vitesse de déplacement de l'utilisateur dans le MV, son déplacement dans le MR (dans l'IL) et les limites de l'espace de travail. La relation qui relie ζ à la position et la vitesse donne un graphique 3D difficile à analyser. La position maximale admissible dans l'IL est donc fixée à 0,9 mètre, ce qui donne une sécurité de 0,1 mètre. Cette position maximale pourra être modifiée en temps réel, mais le temps de calcul devient très long puisque la méthode utilise un algorithme itératif basé sur les moindres carrés. La loi régissant ζ est présentée à la figure 8.10. Des approximations de cette loi sont effectuées avec des polynômes d'ordre un à trois.

Les erreurs de position de l'utilisateur dans l'IL avec l'utilisation des polynômes d'ordre deux et trois sont présentées à la figure 8.11. D'après ce graphique, un polynôme d'ordre trois est jugé suffisant pour cette application. Avec ce polynôme, une simulation du déplacement de l'utilisateur est effectuée pour des vitesses variant de 1 à 20 km/h (voir figure 8.12).

La simulation de la figure 8.14 montre que l'algorithme fonctionne adéquatement avec l'utilisation de la vitesse de l'utilisateur de la figure 8.7 et le polynôme d'ordre trois pour déterminer ζ en fonction de la vitesse. La figure 8.13 montre le ζ calculé pour

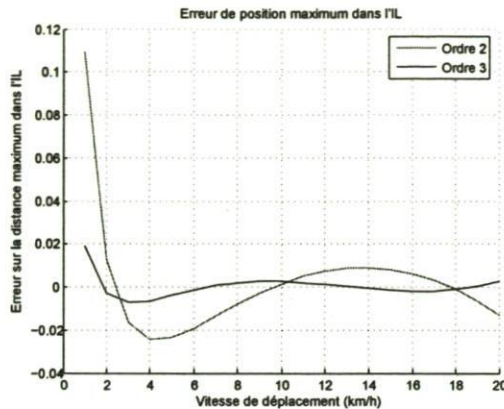


Figure 8.11: Erreurs de position dans l'IL selon l'ordre du polynôme

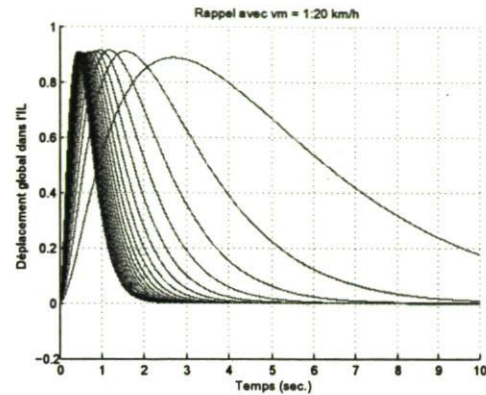


Figure 8.12: Action du rappel de l'utilisateur pour différentes vitesses de déplacement dans le MV

cette simulation.

La plate-forme devra donc suivre le sol virtuel en mouvement. Simplement, il suffit de calculer les forces de frottement statique maximal $f_{s(max)}$ et cinétique f_c apparente en fonction de la force appliquée par l'utilisateur vers le sol virtuel. Si la force appliquée est plus faible que $f_{s(max)}$, la plate-forme sera donc ancrée à un point P_{pfsv} sur le sol virtuel. Le point P_{pfsv} suit évidemment le vecteur de rappel v_w . Cette méthode est intéressante puisqu'il est possible de simuler différents types de sols (comme la glace ou le béton) avec la définition de différents coefficients de friction qui vont générer différentes forces de frottement pour les mêmes géométries du terrain. De la même manière, la force de réaction du sol contre les points de tests $P_{pcpf,i}$ des plates-formes peut varier en fonction du type de sol, ce qui permettrait par exemple de simuler du sable.

Au sujet du calcul de la rotation du sol virtuel, certains auteurs utilisent une analyse du déplacement latéral du pied dans la phase de balancement pour annuler la rotation de l'utilisateur avec une table tournante placée sous le tapis roulant [81]. Une autre méthode serait de suivre les déplacements du centre de masse et des hanches. L'utilisation de quelques points du déplacement du centre de masse donne une bonne approximation de la vitesse de déplacement et de l'orientation autour du lacet. Deux méthodes peuvent être utilisées pour suivre le centre de masse P_{cmu} . La première est d'utiliser l'orientation de l'effecteur du harnais comme il l'est proposé par Vijayakar [52]. Ainsi, l'algorithme de rappel et le harnais doivent travailler ensemble. Cette méthode nécessite donc une

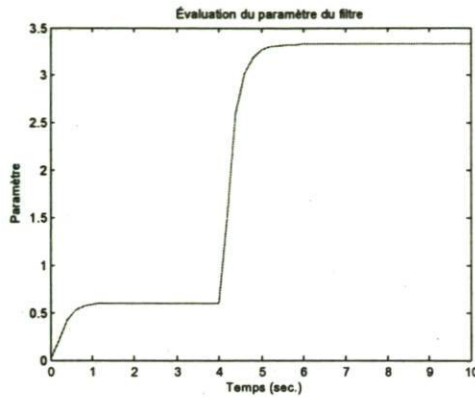


Figure 8.13: Évaluation du paramètre ζ en temps réel

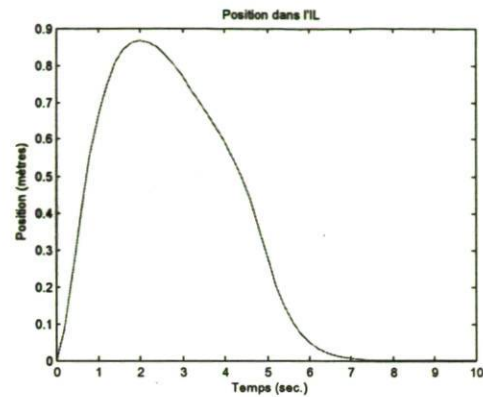


Figure 8.14: Position de l'utilisateur dans l'IL avec ζ variable

commande en impédance du harnais pour suivre l'utilisateur dans ses déplacements. Il serait aussi utile de définir un repère au centre de masse (O_{CM} ou P_{CM}) du marcheur. La deuxième est de modéliser la démarche de l'individu et d'approximer le point P_{cmu} par la définition d'un squelette. Cette méthode est plutôt imprécise, mais avec une bonne modélisation, le résultat pourrait être très intéressant.

8.2.2 Conclusion

Le défi est donc de générer le vecteur de rappel et la matrice de rotation en temps réel pour conserver l'utilisateur dans l'espace de travail et commander l'algorithme de rappel pour éviter que l'utilisateur ressente cette correction. Aussi, la force maximale qu'on peut appliquer à l'utilisateur a un impact direct sur la détermination des dimensions du système. La force de rappel ne peut être ni trop élevée ni trop faible. Dans le premier cas, la personne se rendra compte qu'elle est ramenée. Dans l'autre cas, elle ne doit pas être trop petite, car cela impliquerait d'avoir un espace de travail trop grand.

8.3 Environnements virtuels distribués partagés

Le projet NELI est reconnu pour sa capacité d'interaction multi-usagers. Cette section présente donc les avenues en ce qui concerne les communications entre les usagers tout en maintenant une communication avec le mécanisme à asservir.

Dans les applications SVE (*shared virtual environment*) ou DVE (*distributed virtual environments*), la répétabilité et la nécessité de synchronisation est moins importante que dans les applications de simulation d'événements discrets parallèle (SEDP). La SEDP doit garantir que les événements produits à un certain temps soient toujours traités dans l'ordre dans lequel ils se produisent. Un réseau local comme celui de *Opal-RT* utilise le SEDP. Cette structure évite l'apparition de boucles algébriques et de *dead-locks* lors de l'utilisation de plusieurs processus en multitâches.

A priori, les communications entre les serveurs doivent être minimisées afin de ne pas surcharger le réseau et de permettre une simulation temps réel en coopération. Cependant, la quantité d'information augmente en proportion avec la complexité de l'environnement virtuel distribué (SVE). Les données transmises peuvent congestionner le réseau occasionnant des délais, des sautilllements (*jitter*) et des pertes d'informations.

Les trois approches à l'étude dans cette dissertation sont : les dépôts de données centraux (*Central repositories*), les mises-à-jour fréquente (*Frequent State Regeneration*) et la prédiction (*Dead-Reckoning*). Les avantages et les inconvénients sont résumés à la figure 8.15.

Le problème majeur relié à la simulation de RV multi-utilisateurs est celui de la survie de la simulation face à une panne de communication. La simulation doit continuer même si un des multiples moteurs de RV tombe en panne. Le simulateur militaire SIMNET, qui a plus de 200 serveurs dans le monde, a utilisé la méthode de *dead-reckoning* ou poursuite locale de la simulation basée sur une approximation prédictive de l'action des autres participants. La précision de la simulation (position des objets, des inetractions, etc.) devient donc un désavantage [47].

Une décision importante de conception doit être prise dans le design des SVE en ce qui concerne la distribution géographique des ressources et des participants pour

Dépôts de données centraux	
Avantages <ul style="list-style-type: none"> • capacité de stockage élevée • modèle simple du point de vue de l'implantation • un changement d'état sur une entité est immédiatement visible à tous les participants • assurent une cohérence complète au prix d'un <i>overhead</i> de communication élevé 	Désavantages <ul style="list-style-type: none"> • temps d'accès lent (peut être réduit si on utilise un dépôt « virtuel ») • possibilité de perte des données en cas de panne du serveur
Mises-à-jour fréquente	
Avantages <ul style="list-style-type: none"> • les entités sont la propriété d'un hôte spécifique • allège le traitement des changements d'état • permet de transformer une application à un seul hôte en une application à plusieurs hôtes (grâce au <i>broadcasting</i>) • comme la cohérence totale de l'EV n'est pas exigée, cela permet d'inclure plus d'entités dans l'EV 	Désavantages <ul style="list-style-type: none"> • un changement d'état est « <i>broadcasté</i> » à l'aveuglette (i.e. sans <i>acknowledgement</i>) • le <i>broadcasting</i> des changements d'état exige une grande bande passante • la latence du réseau cause des problèmes de réalisme • la position d'un objet peut être mise à jour de manière irrégulière (<i>jitter</i>)
Prédiction	
Avantages <ul style="list-style-type: none"> • réduction de la bande passante • absence de serveur central 	Désavantages <ul style="list-style-type: none"> • uniformité de l'état non garantie sur chaque hôte • n'est pas générique

Figure 8.15: Avantages et inconvénients des trois approches pour les DVE

les calculs associés à la simulation. Selon Fujimoto [236], trois approches génériques sont possibles : une architecture avec un serveur central, une architecture avec un serveur distribué sur un *cluster* et une architecture distribuée sans serveur. La méthode centralisée est la plus simple au niveau de son implémentation et de son implantation puisque l'information globale concernant l'état de la simulation est située sur un seul ordinateur. Cependant, une augmentation du nombre d'entités pourrait être critique sur le temps de calcul (nombre de cycles de calcul disponible par entité). Dans le cas du serveur distribué ou sans serveur, le nombre de CPU peut augmenter en proportion du nombre d'entités simulées. Un *cluster* de stations de travail offre l'avantage d'un temps de latence faible et une communication large bande entre chaque processeur à l'intérieur du serveur. Si la majorité de la communication est entre les *cluster* des stations de travail contrairement à des communications inter-utilisateurs, il y a un avantage significatif à utiliser un serveur distribué.

Chapitre 9

Conclusion

Le développement d'une interface de locomotion haptique et miniature qui assure une démarche naturelle dans un environnement virtuel nécessite une investigation très spécifique dans plusieurs domaines d'études. Cet ouvrage décrit les différents aspects du développement d'une interface de locomotion innovatrice incluant le système mécanique, l'asservissement articulaire des enrouleurs, l'asservissement cartésien pour le rendu haptique, la gestion des interférences et les algorithmes de rappel avec un harnais dorsal. Un des objectifs principaux est de limiter la complexité des concepts en optant pour des solutions simples et accessibles tout en réduisant le temps de calcul de chaque algorithme.

9.1 Introduction

Ces travaux de recherche proposent d'élaborer un gestionnaire d'asservissement et de contrôle d'un mécanisme qui permet non seulement une démarche naturelle dans un environnement virtuel, mais aussi qui facilite la simulation d'un plancher à topologie variable tout en étant omnidirectionnel. Ce système multi-sensoriel visuo-haptique commande donc l'interaction entre l'humain, un mécanisme et la physique de l'environnement virtuel de manière bilatérale. De manière générale, la commande multi-sensoriel est élaborée afin d'augmenter l'optimisation de la prise de décision dans un environnement virtuel à l'aide d'une interface qui définit un environnement ergonomique et adapté à l'humain.

Ce type de mécanisme peut être utilisé dans plusieurs domaines, soit de l'entraînement jusqu'au divertissement. Dans le domaine de la réalité virtuelle, une interface de marche doit permettre une démarche naturelle sans nécessiter une demande cognitive de la part de l'utilisateur. De plus, un bon gestionnaire de la sécurité inclu dans l'architecture logicielle du servocontrôleur doit éviter ou au moins compenser les pertes d'équilibre de l'utilisateur. En effet, dans les systèmes de locomotion présentés dans la revue de la littérature, l'utilisateur doit apprendre à marcher sur la plate-forme pour éviter de dépasser la dynamique du mécanisme, ce qui contraint la démarche et l'analyse de celle-ci dans un contexte de réadaptation.

Ce chapitre est divisé en trois sections. La première section explique l'utilité d'implanter un simulateur pour valider et certifier l'ensemble des sous-systèmes. Ce simulateur fait partie d'un plan de tests et ne constitue pas une contribution des travaux de recherche. La deuxième section explique en détail chaque contribution de cette thèse. Finalement, la dernière section propose les améliorations techniques nécessaires au fonctionnement du projet. Ce chapitre renferme des éléments importants que les chercheurs doivent s'approprier pour développer des systèmes plus sécuritaire pour l'humain et pour atteindre leurs objectifs de recherche.

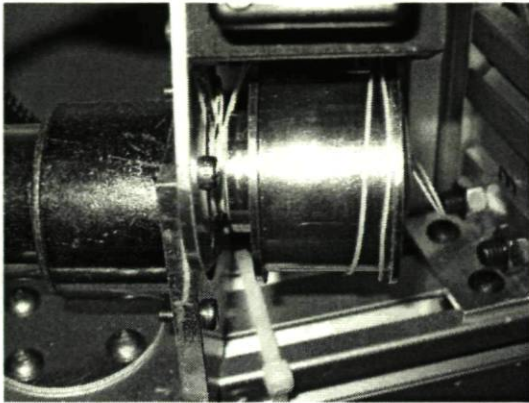


Figure 9.1: Enroulement du câble lorsque celui-ci quitte la poulie pour une commande discontinue en tension

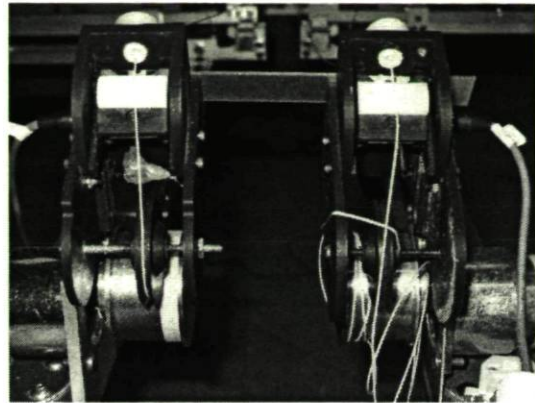


Figure 9.2: Vue arrière des deux enrouleurs avec un problème d'enroulement du câble

9.2 Simulateur HIL

Il est nécessaire d'assurer la qualité du produit final en incluant un simulateur qui contient le maximum de sous-systèmes. En effet, les systèmes uniques et dispendieux dont les temps de conception et de fabrication sont limités requiert d'être analysés d'une manière supervisée pour réduire les risques et les incertitudes avant les essais réels et avant son déploiement. Entre autres, plusieurs expérimentations ont démontré que l'utilisation des enrouleurs pour valider le fonctionnement d'un algorithme se traduit directement par un échec comme le montre les figures 9.1, 9.2, 9.3 et 9.4. Il est donc important de prouver la fiabilité et la fonctionnalité de l'ensemble des sous-systèmes mis en commun par l'intermédiaire d'un simulateur avant un essai complet incluant tout le mécanisme.

Ce système de simulation temps-réel, communément nommé HIL, étudie les risques potentiels et les solutions concrètes à apporter lors d'un problème. Cette étude supervisée doit inclure un maximum d'éléments du système à l'étude. Dans le cas d'une interface de locomotion, les capteurs, les actionneurs et les algorithmes du rendu haptique doivent être complètement certifiés.

L'ajout des sous-systèmes réels dans les plans de tests permet de contrôler la simulation dans l'objectif de valider certaines sections du logiciel dont la poursuite d'une trajectoire avec l'interpolation cartésienne ou articulaire, le rendu visuel dans l'envi-

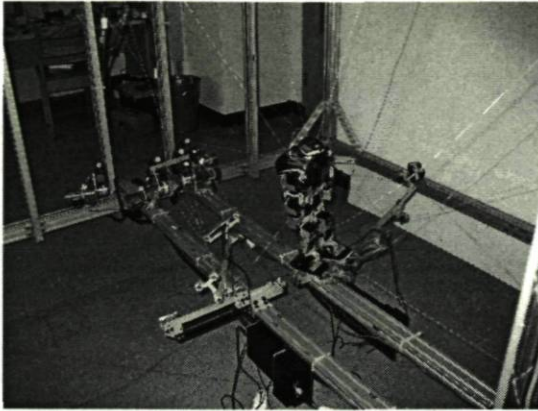


Figure 9.3: Résultat lorsque le mécanisme entre dans une zone instable

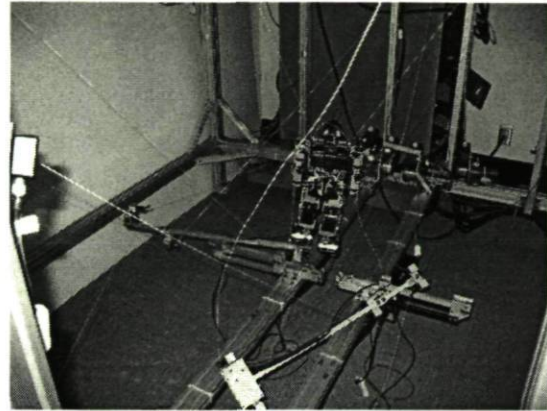


Figure 9.4: Vue arrière du robot marcheur Kondo après une instabilité

ronnement et l'optimisation de la distribution des tensions dans les câbles. Bien que ce simulateur ne soit pas présenté dans cet ouvrage, il a été implanté de manière intrinsèque dans l'architecture du logiciel.

Deux modes de tests existent pour activer le simulateur. Dans le premier mode, l'architecture logicielle assure le déroulement des tests de manière automatique lorsque l'asservissement articulaire est inactif. Dans ce cas, il est aussi possible de valider le comportement de l'avatar avec le rendu de l'environnement virtuel. Le deuxième mode utilise deux fichiers d'entrée et de sortie contenant les données pour effectuer une simulation comme, par exemple, les données reliées aux capteurs d'efforts, aux positions des plates-formes et aux tensions dans les câbles. Ce mode est activé lorsque le client sur le réseau n'est pas détecté, soit lorsque le servocontrôleur est activé directement dans un *Shell* de QNX. Un autre mode existe pour le calibrage de chaque enrouleur. C'est un logiciel complet, quasi automatique, qui contient les différents algorithmes d'optimisation dont les *Extremum Seeking Tuning*, les algorithmes de compensation dont *LuGre* et l'ajustement des filtres anti-repliements et des dérivées.

9.3 Contributions

Cette thèse propose plusieurs contributions. La première est le développement d'une interface de locomotion entraînée par des câbles dont chaque plate-forme peut être as-

servie selon les six DDL. Le système intégré avec les différents modules présentés dans cette thèse est représenté par la figure 9.5. L'idée d'une interface de locomotion entraînée par des câbles a déjà été présentée, en partie, avec le *StringWalker*. Mais, chaque plate-forme est actionnée uniquement dans un plan et l'interaction avec les objets virtuels est très limitée. Cette idée est nettement améliorée dans le présent travail et permet d'interagir avec tous les types d'objets virtuels. Il sera aussi possible d'ajouter un harnais similaire à celui développé par Ottaviano [25] pour assurer sa sécurité et pour simuler différentes contraintes tout en aidant l'algorithme de rappel. La deuxième contribution est le développement d'un algorithme amélioré basé sur les *Extremum Seeking Tuning* afin de définir un critère pour l'assurance qualité. La troisième contribution est le développement d'un moteur physique qui tient compte de la géométrie des points de contact. Finalement, la dernière contribution porte sur un élément de sécurité, soit la gestion des interférences entre les câbles. Plus particulièrement, les prochains paragraphes expliquent en détail les contributions mentionnées ci-dessus.

Dans la première partie de cette thèse, une étude de la méthodologie de la réalisation du projet est présentée. Cette méthodologie étudie les contraintes de la conception du mécanisme, de l'électronique (le système d'acquisition) et de l'architecture logicielle dédiée à l'asservissement et au contrôle. Par ailleurs, le système d'acquisition doit être développé suivant un cahier des charges qui répond à la dynamique humaine. Par exemple, pour la commande avec une rétroaction sur les efforts, il est nécessaire d'obtenir une bande passante supérieure à 30 Hz alors que le rendu de la texture nécessite une bande passante de plus de 400 Hz. Ce critère, avec le mécanisme actuel n'a cependant pas été rencontré (bande passante entre 15 et 30 Hz en fonction la longueur du câble et sa tension). Le système d'acquisition doit aussi limiter le bruit sur les mesures. La solution est de sur-échantillonner et de filtrer par décimation de manière adaptative. Cependant, considérant les contraintes matérielles (nombre de cartes d'acquisition analogiques, latence du système d'exploitation) et le nombre de signaux à traiter, il est difficile de sur-échantillonner au-dessus de deux fois la contrainte minimale fixée à une fréquence d'échantillonnage de 500 Hz.

Dans la deuxième partie de la thèse, un algorithme d'optimisation pour l'asservissement articulaire et cartésien est proposé. Au niveau de l'asservissement articulaire, cet algorithme est nécessaire puisque chaque enrouleur a une réponse différente en boucle fermée. Cet algorithme est donc utilisé comme un critère de performance sur le rendu de l'impédance. Aussi, il n'est pas souhaité d'obtenir une commande optimale. En effet,

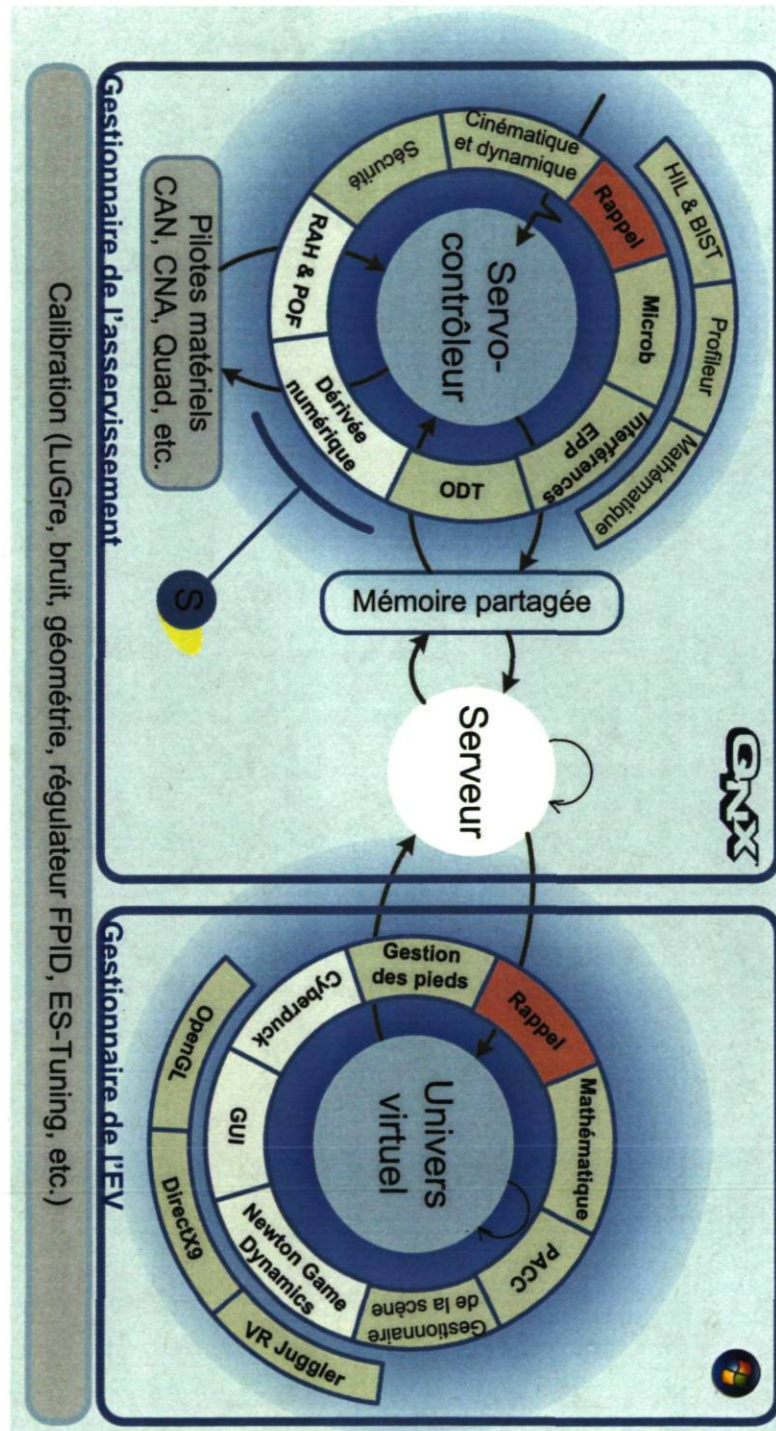


Figure 9.5: Système complet intégré avec les différents modules de NELI

il est préférable d'obtenir des réponses similaires entre les enrouleurs en fixant la valeur de la fonction de coût à obtenir. Cette valeur permet donc de définir un critère de l'assurance qualité de la réponse de chaque enrouleur dans le cas d'une production de masse. Au niveau cartésien, cette optimisation est nécessaire puisque la géométrie du mécanisme est anisotrope. Il faut donc aussi fixer la valeur de la fonction de coût pour que le rendu de l'impédance donne une réponse **similaire dans les six DDL**. D'un autre côté, les paramètres de la commande en admittance sont **fixés de manière** à produire un contact le plus rigide possible.

Dans la troisième partie de la thèse, des solutions aux problèmes de comportement réel du câble sont étudiées. Entre autres, deux critères de performance sont élaborés pour améliorer le rendu d'impédance cartésien. Ces deux critères de performance sont utiles lors de l'optimisation de la distribution des tensions dans les câbles. Par la suite, l'effet du câble en boucle ouverte est étudié dans le cas où deux enrouleurs sont placés face-à-face. Une procédure est décrite pour déterminer les meilleurs paramètres du régulateur de la commande de la tension en fonction de la longueur du câble. Pour des applications haptiques, une comparaison de la performance de l'enrouleur est présentée en utilisant la loi de Weber-Fechner, qui définit le seuil différentiel comme une limite en dessous de laquelle un individu ne parvient plus à différencier deux stimulations d'intensité différentes. Cette comparaison a permis de trouver une équation qui démontre que les enrouleurs ne sont pas suffisamment performants pour une application haptique avec une commande cartésienne en impédance.

Dans la quatrième partie de la thèse, un moteur physique temps réel est développé pour les mécanismes entraînés par des câbles. Cette partie est davantage théorique puisque le mécanisme n'est pas en mesure de rendre adéquatement la commande en impédance due à une hystérésis de la friction beaucoup trop élevée. Aussi, la dynamique de l'enrouleur est insuffisante lors de la poursuite d'une commande de tension. L'approche proposée consiste à sélectionner la classe de la commande en fonction de l'interaction entre le modèle du pied virtuel et l'objet virtuel. Dans le cas le plus simple, la commande hybride est configurée pour la reproduction d'un obstacle rigide dans la direction normale aux points de contact alors que, dans les autres directions, la plateforme peut se déplacer librement.

Finalement, dans la dernière partie de la thèse, un élément de sécurité, parmi plusieurs autres, est étudié. Considérant l'interaction humain-machine, il est nécessaire

d'étudier la sécurité des mécanismes robotiques. Puisque le système a une certaine autonomie et qu'il peut répondre inadéquatement à des stimuli, il est nécessaire de trouver des solutions qui évitent tout risque pour l'humain. Plus particulièrement, la gestion des interférences entre les pièces mécaniques de l'interface de locomotion est étudiée. Une approche prédictive est proposée pour asservir et contrôler adéquatement ces interférences. Cette approche permet, entre autres, de réduire les discontinuités dans les valeurs de tensions tout en considérant le comportement réel d'un câble (fléchissement dû au poids).

9.4 Améliorations techniques

Le développement d'un tel système nécessite beaucoup d'intégration logicielle et matérielle d'un ensemble de sous-systèmes. Un travail considérable et inachevé demeure pour la réalisation d'une interface de locomotion qui répond à des performances suffisantes et similaires à celles de l'humain. Entre autres, il serait possible d'améliorer l'asservissement articulaire avec un meilleur design de l'enrouleur. Aussi, il serait préférable de réduire l'anisotropie du mécanisme afin d'obtenir un meilleur rendu haptique. Toute l'architecture logicielle du servocontrôleur devrait être revue et retravaillée afin de permettre un sur-échantillonnage ou un sous-échantillonnage. Ainsi, la première couche de l'architecture devra être revue pour s'assurer qu'un système multi-cadence soit possible.

La première étape est, avant tout, d'effectuer une étude globale des risques. Les risques identifiés doivent être gérés de manière à réduire les incertitudes sur le fonctionnement de l'interface et assurer la sécurité de l'utilisateur. Cette gestion des risques se traduit par la planification d'un ensemble de tests automatisé et semi-automatisé, par la conception d'un HIL et par la création d'un gestionnaire de sécurité.

« En effet, le travail au sein d'équipes multidisciplinaires exige de l'ingénieur qu'il redouble de vigilance pour s'assurer que la sécurité des machines est toujours prise en compte et qu'il exerce son leadership. [...] trop souvent encore des ingénieurs ne sont pas assez conscients de l'importance du rôle qu'ils doivent jouer pour assurer la sécurité des travailleurs et opérateurs de machines. [...] Pourtant, le Code de déontologie est très clair sur les devoirs

de l'ingénieur en matière de sécurité. L'article 2.01 établit que dans tous les aspects de son travail, l'ingénieur doit respecter ses obligations envers l'humain et tenir compte des conséquences de l'exécution de ses travaux sur l'environnement et sur la vie, la santé et la propriété de toute personne. [...] Les raccourcis dans la conception et la réduction à court terme des coûts de fabrication peuvent avoir des conséquences néfastes pour la santé et la sécurité des travailleurs. » [237]

Une fois que les problèmes de sécurité seront résolus, il sera possible d'améliorer le design mécanique et le design du système d'acquisition et de commande. Dans cet ordre d'idées, il sera possible de concevoir et de réaliser des amplificateurs de puissance qui répondent aux normes et aux exigences médicales et industrielles en plus de considérer les aspects de sécurité nécessaire lors d'une interaction humain-machine. En plus de posséder des capacités de test automatique, ce type d'amplificateur doit (mais ne se limite pas à ces points) gérer les signaux flottants, interdire le contournement des fautes et inclure un bouton de sécurité sur l'usager (dont un bouton de sécurité sans-fil). D'ailleurs, les recommandations sur la conception d'un enrouleur dans le chapitre 5 doivent être considérées de même que les travaux futurs du chapitre 8 : la réalisation de deux harnais passif et actif et la réalisation du système asservi pour le rappel.

Finalement, la synthèse des nouveaux matériaux (*i.e.*, terre, sable, eau, roche) avec des déformations non-linéaires et avec un rendu multimodal (audio et haptique) devra être développé pour améliorer le réalisme de l'immersion dans l'environnement virtuel. Une telle synthèse nécessitera une nouvelle conception d'un réseau de capteurs pour simuler des surfaces interactives et distribuées.

Index

A

assurance qualité, 86
BIST, 76, 168

C

commande
admittance, 47, 48, 78, 157
impédance, 77, 157
cybersickness, 14–16

E

espace de travail
EPP, 72, 127
estimation
collisions, 80
interférence, 139

F

friction
cône, 54, 172, 178, 179
hystérésis, 113, 159
LuGre, 121
statique, 107, 168
vibrations, 117

H

haptique

interface, 2, 19

rendu, 2, 129, 137, 176

harnais, 13, 23, 36, 38, 58, 81, 169, 187,
199, 203, 207

I

interférence, 79

M

matrice

immittance, 157

inertie, 167

Jacobienne, 129

sélection, 169, 171

modèle

hybride, 46

impédance, 47

objet virtuel, 157, 177, 179

mécanisme

impédance, 155

R

régulateur

FPID, 17, 90, 170

rappel, 13, 81, 188

S

sens, 6, 65

simulateur

 HIL, 76, 168, 201

stabilité, 20, 67, 159

système

 multi-cadence, 67, 76, 206

sécurité, 20–22

 harnais, 187

 humain-machine, 206

 interférence, 131, 205

 tolérance aux fautes, 121, 168

T

transparence, 159

 compensations cartésiennes, 166

 définition, 85

 facteurs, 6

 fonction de coût, 92

Bibliographie

- [1] J. COLIN et J. TIMBAL, *Médecine aérospatiale, deuxième édition*. Paris VI, France : Expansion scientifique, 1999.
- [2] E. VIEL, *La marche humaine, la course et le saut (Biomécanique, explorations, normes et dysfonctionnements)*. Paris : Masson, 2000.
- [3] R. POULIN, « Système de contrôle 2d d'un mécanisme à câble destiné à une interface de locomotion », Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 2005.
- [4] T. L. BROOKS, « Telerobotic response requirements », *Comptes rendus – International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (Los Angeles, CA, États-Unis), p. 113 – 120, IEEE, nov. 1990.
- [5] L. REID et M. A. NAHON, « Flight simulation motion-base drive algorithms : Part 1-developing and testing the equations », *Université de Toronto : Institute for aerospace studies*, 1985.
- [6] B. DE GRAAF et W. VAN WEPEREN, « Retention of balance : An exploratory study into the limits of acceleration the human body can withstand without losing equilibrium », *Human Factors*, vol. 39, n° 1, p. 111 – 118, 1997.
- [7] M. J.-D. OTIS, T.-L. NGUYEN-DANG, T. LALIBERTÉ, D. OUELLET, D. LAURENDEAU et C. GOSSELIN, « Cable tension control and analysis of reel transparency for 6-dof haptic foot platform on a cable-driven locomotion interface », *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, vol. 3, n° 1, p. 16 – 29, 2009.

- [8] J. HOLLERBACH, D. GROW et C. PARKER, « Developments in locomotion interfaces », *Comptes rendus – 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, vol. 2005, (Chicago, IL, États-Unis), p. 522 – 525, 2005.
- [9] H. IWATA, H. YANO et M. TOMIYOSHI, « String walker », *Comptes rendus – ACM SIGGRAPH : emerging technologies*, (San Diego, California), p. 20 – 24, ACM, 2007. New York, NY, États-Unis.
- [10] H. IWATA, H. YANO et F. NAKAIZUMI, « Gait master : a versatile locomotion interface for uneven virtual terrain », *Comptes rendus – Virtual Reality*, (Yokohama, Japan), p. 131 – 137, IEEE, 2001.
- [11] H. SCHMIDT, D. SOROWKA, S. HESSE et R. BERNHARDT, « Robotic walking simulator for neurological gait rehabilitation », *Comptes rendus – Engineering in Medicine and Biology (EMBS)*, vol. 3, (Houston, TX, États-Unis), p. 2356 – 2357, 2002.
- [12] H. SCHMIDT, S. HESSE et R. BERNHARDT, « Hapticwalker - a novel haptic foot device », *ACM Transaction on Applied Perception*, vol. 2, n° 2, p. 166 – 180, 2005.
- [13] B. NOVANDY, J. YOON et CHRISTIAND, « A vr navigation of a 6-dof gait rehabilitation robot with upper and lower limbs connections », *Comptes rendus – International Conference on Humanoid Robots*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 592 – 597, IEEE/RAS, 2008.
- [14] G. SEVILLANO, D. ELIAS, R. CALLUPE, R. MARCACUZCO et B. BARRIGA, « Gait simulator based on the parallel stewart-gough platform », *Comptes rendus – Conference on Interdisciplinary Applications of Kinematics*, (Lima, Peru), p. 1 – 10, 2008.
- [15] H. NOMA et T. MIYASATO, « Design for locomotion interface in a large scale virtual environment atlas : Atr locomotion interface for active self motion », *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division*, vol. 64, p. 111 – 118, 1998.
- [16] H. NOMA, T. SUGIHARA et T. MIYASATO, « Development of ground surface simulator for tel-e-merge system », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (New Brunswick, NJ, États-Unis), p. 217 – 224, 2000.
- [17] R. DARKEN, W. COCKAYNE et D. CARMEIN, « The omni-directional treadmill : a locomotion device for virtual worlds », *Comptes rendus – ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, (Banff, Alberta, Canada), p. 213 – 221, 1997.

- [18] H. IWATA, « Walking about virtual environments on an infinite floor », *Comptes rendus – Virtual Reality*, (Houston, TX, États-Unis), p. 286 – 293, IEEE, 1999.
- [19] M. SCHWAIGER, T. THUMMEL et H. ULBRICH, « Cyberwalk : An advanced prototype of a belt array platform », *Comptes rendus – International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Games*, (Ottawa, ON, Canada), p. 50 – 55, IEEE, oct. 2007.
- [20] M. SCHWAIGER, T. THUMMEL et H. ULBRICH, « Cyberwalk : Implementation of a ball bearing platform for humans », *Comptes rendus – Human-Computer Interaction : Interaction Platforms and Techniques*, vol. 2, (Berlin, Allemagne), p. 926 – 935, Springer-Verlag, 2007.
- [21] K. J. FERNANDES, V. RAJA et J. EYRE, « Cybersphere : the fully immersive spherical projection system », *Communication ACM*, vol. 46, n° 9, p. 141 – 146, 2003.
- [22] H. IWATA, H. YANO, H. FUKUSHIMA et H. NOMA, « Circulafloor », *Computer Graphics and Applications*, vol. 25, n° 1, p. 64 – 67, 2005.
- [23] J.-D. DESCHENES, P. LAMBERT, S. PERREAULT, N. MARTEL-BRISSON, N. ZOSO, A. ZACCARIN, P. HEBERT, S. BOUCHARD et C. GOSSELIN, « A cable-driven parallel mechanism for capturing object appearance from multiple viewpoints », *Comptes rendus – International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, (Los Alamitos, CA, États-Unis), p. 351 – 358, 2007.
- [24] H. KINO, S. YABE et S. KAWAMURA, « A force display system using a serial-link structure driven by a parallel-wire mechanism », *Advanced Robotics*, vol. 19, n° 1, p. 21 – 37, 2005.
- [25] E. OTTAVIANO, G. CASTELLI et G. CANNELLA, « A cable-based system for aiding elderly people in sit-to-stand transfer », *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 36, p. 310 – 329, oct. 2008.
- [26] G. ROSATI, M. ANDREOLLI, A. BIONDI et P. GALLINA, « Performance of cable suspended robots for upper limb rehabilitation », *Comptes rendus – International Conference on Rehabilitation Robotics*, (Noordwijk, Pays-Bas), p. 385 – 392, IEEE, juin 2007.
- [27] R. IKEURA, H. MONDEN et H. INOOKA, « Cooperative motion control of a robot and a human », *Comptes rendus – International Workshop on Robot and Human Communication*, (Nagoya, États-Unis), p. 112 – 117, IEEE, 1994.
- [28] T. TSUMUGIWA, R. YOKOGAWA et K. YOSHIDA, « Stability analysis for impedance control of robot for human-robot cooperative task system », *Comptes ren-*

- dus – International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 4, (Sendai, Japan), p. 3883 – 3888, IEEE, 2004.
- [29] D. A. WINTER, *Biomechanics and motor control of human movement*. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2005.
 - [30] F. PLAS, E. VIEL et Y. BLANC, *La marche humaine, kinésiologie dynamique biomécanique et pathomécanique*. Paris, France : Masson, 1989.
 - [31] B. J. MCFADYEN et F. PRINCE, « Avoidance and accomodation of surface height changes by healty, community-dwelling, young, and elderly men », *Journal of Gerontology : Biological sciences*, vol. 57A, n° 4, p. B166–B174, 2002.
 - [32] M. WOJTYRA, « Dynamical analysis of human walking », *Comptes rendus – 15th European ADAMS Users' Conference*, 2000.
 - [33] S. PERREAULT et C. GOSSELIN, « Cable-driven parallel mechanisms : application to a locomotion interface », *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, p. 2301 – 2308, oct. 2008.
 - [34] H. IWATA, « Torus treadmill : Realizing locomotion in ves », *Computer Graphics and Applications*, vol. 19, n° 6, p. 30 – 35, 1999.
 - [35] F. DROLET, « Cohérence et synchronisation dans un environnement virtuel multi-sensoriel réparti », Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 2008.
 - [36] P. GORMAN, « Supertroop via i-port : Distributed simulation technology for combat development and training development », *Comptes rendus – IDA Paper*, (Alexandria, VA : Institute for Defense Analysis), p. 2374 – 2452, août 1990.
 - [37] F. STEINICKE, G. BRUDER, L. KOHLI, J. JERALD et K. HINRICHS, « Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback », *Comptes rendus – International Conference on Cyberworlds*, (Hangzhou, China), p. 217 – 223, IEEE, 2008.
 - [38] J. TEMPLEMAN, P. DENBROOK et L. SIBERT, « Virtual locomotion : walking in place through virtual environments », *Presence*, vol. 8, p. 598 – 617, déc. 1999.
 - [39] D. A. BOWMAN, D. KOLLER et L. F. HODGES, « Travel in immersive virtual environments : an evaluation of viewpoint motion control techniques », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (Albuquerque, NM, États-Unis), p. 45 – 52, IEEE Comput. Soc., 1997.
 - [40] L. BOUGUILA, F. EVEQUOZ, M. COURANT et B. HIRSBRUNNER, « Walking-pad : A step-in-place locomotion interface for virtual environments », *International Conference on Multimodal Interfaces*, p. 77 – 81, 2004.

- [41] D. R. LAMPTON, D. P. McDONALD, M. SINGER et J. P. BLISS, « Distance estimation in virtual environments », *Comptes rendus – Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 2, (San Diego, CA, États-Unis), p. 1268 – 1272, 1995.
- [42] R. EGGLESTON, W. JANSON et K. ALDRICH, « Virtual reality system effects on size-distance judgements in a virtual environment », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (Santa Clara, CA, États-Unis), p. 139 – 146, IEEE, 1996.
- [43] E. UNGUDER, « The effects of natural locomotion on maneuvering task performance in virtual and real environments », Mémoire de maîtrise, NAVAL POST-GRADUATE SCHOOL, Monterey, California, 2001.
- [44] J. D. MACKINLAY, S. K. CARD et G. G. ROBERTSON, « Rapid controlled movement through a virtual 3d workspace », *Computer Graphics*, vol. 24, n° 4, p. 171 – 176, 1990.
- [45] D. BOWMAN, D. KOLLER et L. HODGES, « A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments », *Virtual Reality*, vol. 3, n° 2, p. 120 – 131, 1998.
- [46] M. COOMANS et H. TIMMERMAN, « Towards a taxonomy of virtual reality user interfaces », *Comptes rendus – Information Visualization Conference*, (London, England), p. 279 – 284, 1997.
- [47] G. BURDEA, *La réalité virtuelle*. Paris : Hermès, 1993.
- [48] M. L. MCLAUGHLIN, *Touch in virtual environments : haptics and the design of interactive systems*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall PTR, 2002.
- [49] R. CHRISTENSEN, J. HOLLERBACH, Y. XU et S. MEEK, « Inertial-force feedback for the treadport locomotion interface », *Presence (États-Unis)*, vol. 9, p. 1 – 14, fév. 2000.
- [50] J. HOLLERBACH, R. MILLS, D. TRISTANO, R. CHRISTENSEN, W. THOMPSON et Y. XU, « Torso force feedback realistically simulates slope on treadmill-style locomotion interfaces », *International Journal of Robotics Research*, vol. 20, p. 939 – 952, déc. 2001.
- [51] R. C. HAYWARD et J. M. HOLLERBACH, « Implementing virtual stairs on treadmills using torso force feedback », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, (Washington, DC, États-Unis), p. 586 – 591, 2002.

- [52] A. VIJAYAKAR et J. HOLLERBACH, « Effect of turning strategy on maneuvering ability using the treadport locomotion interface », *Presence*, vol. 11, n° 3, p. 247 – 258, 2002.
- [53] M. HAVRON et L. BUTLER, « Evaluation of training effectiveness of the 2h2 helicopter flight trainer research tool », rapport technique, **Naval Training Device Center**, 1957.
- [54] P. DIZIO et J. LACKNER, « Spatial orientation, adaptation and motion sickness in real and virtual environments », *Presence-Teleoperators and virtual environments*, vol. 1, n° 3, p. 319 – 328, 1992.
- [55] S. NICHOLS et H. PATEL, « Health and safety implications of virtual reality : A review of empirical evidence », *Applied Ergonomics*, vol. 33, n° 3, p. 251 – 271, 2002.
- [56] J. LA VIOLA, J.J., « A discussion of cybersickness in virtual environments », *SIGCHI Bulletin*, vol. 32, p. 47 – 56, jan. 2000.
- [57] J. J. LIN, H. ABI-RACHED et M. LAHAV, « Virtual guiding avatar : An effective procedure to reduce simulator sickness in virtual environments », *Comptes rendus – Conference on Human Factors in Computing Systems*, (Vienna, Austria), p. 719 – 726, 2004.
- [58] K. HILL et P. HOWARTH, « Habituation to the side effects of immersion in a virtual environment », *Displays*, vol. 21, p. 25 – 30, mars 2000.
- [59] F. GOSSELIN, C. ANDRIOT, J. SAVALL et J. MARTIN, « Large workspace haptic devices for human-scale interaction : A survey », *Comptes rendus – EuroHaptics, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5024 LNCS, (Madrid, Spain), p. 523 – 528, 2008.
- [60] C. GOSSELIN, « Locomotion simulation apparatus, system and method ». brevet des États-Unis no. 0 171 199 A1, juin 2007.
- [61] M. USOH, K. ARTHUR, M. C. WHITTON, R. BASTOS, A. STEED, M. SLATER et F. P. J. BROOKS, « Walking, walking-in-place, flying, in virtual environments », *Comptes rendus – ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, (Los Angeles, CA, États-Unis), p. 359 – 364, 1999.
- [62] H. IWATA et T. FUJII, « Virtual perambulator : a novel interface device for locomotion in virtual environment », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (Santa Clara, CA, États-Unis), p. 60 – 65, IEEE, 1996.
- [63] S. LANDSBERGER et T. SHERIDAN, « Minimal, minimal linkage, the tension-compression parallel link manipulator », *Comptes rendus – Transactions of the*

- IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems*, (Kobe, Japon), p. 81 – 87, 1993.
- [64] G. BARRETTE, « Analyse des mécanismes parallèles actionnés par câbles », Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 2000.
 - [65] G. CÔTÉ, « Analyse et conception de mécanismes parallèles actionnés par câbles », Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 2003.
 - [66] S. KAWAMURA, W. CHOE, S. TANAKA et S. PANDIAN, « Development of an ultrahigh speed robot falcon using wire drive system », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, (Nagoya, Japan), p. 215 – 220, IEEE, 1995.
 - [67] S. BEHZADIPOUR et A. KHAJEPOUR, « Stiffness of cable-based parallel manipulators with application to stability analysis », *Journal of Mechanical Design*, vol. 128, p. 303 – 310, jan. 2006.
 - [68] D. PRATT, P. BARHAM, J. LOCKE, M. ZYDA, B. EASTMAN, T. MOORE, K. BIGGERS, R. DOUGLASS, S. JACOBSEN, M. HOLLICK, J. GRANIERI, H. KO et N. BADLER, « Insertion of an articulated human into a networked virtual environment », *Comptes rendus – Conference on AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems. Distributed Interactive Simulation Environments*, (Gainesville, FL, États-Unis), p. 84 – 90, 1994.
 - [69] G. ROSTON et T. PEURACH, « A whole body kinesthetic display device for virtual reality applications », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, (Albuquerque, NM, États-Unis), p. 3006 – 3011, IEEE, 1997.
 - [70] D. P. HAANPAA et G. P. ROSTON, « Advanced haptic system for improving man-machine interfaces », *Computers and Graphics*, vol. 21, n° 4, p. 443 – 449, 1997.
 - [71] J. YOON et J. RYU, « Continuous walking over various terrains - a walking control algorithm for a 12-dof locomotion interface », *Comptes rendus – International Conference Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*, vol. 1, (Wellington, New Zealand), p. 210 – 217, 2004.
 - [72] G. P. ROSTON, E. ENDSLEY, A. RIGGS et C. J. JACOBUS, « Whole body kinesthetic displays for immersive virtual reality applications », *Comptes rendus – International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, (Orlando, FL, États-Unis), p. 2357 – 2362, IEEE, 1997.
 - [73] M. BERNHARDT, M. FREY, G. COLOMBO et R. RIENER, « Hybrid force-position control yields cooperative behaviour of the rehabilitation robot loko-

- mat », *Comptes rendus – International Conference on Rehabilitation Robotics*, (Chicago, IL, États-Unis), p. 536 – 539, IEEE, 2005.
- [74] H. SCHMIDT, S. HESSE et R. BERNHARDT, « Safety concept for robotic gait trainers », *Comptes rendus – International Conference on Engineering in Medicine and Biology (EMBS)*, vol. 26 I, (San Francisco, CA, États-Unis), p. 2703 – 2706, 2004.
- [75] H. SCHMIDT, D. SOROWKA, F. PIORKO, N. MARHOUL et R. BERNHARDT, « Control system for a robotic walking simulator », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (New Orleans, LA, États-Unis), p. 2055 – 2060, 2004.
- [76] J. van DOORNIK et T. SINKJAER, « Robotic platform for human gait analysis », *Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, p. 1696 – 1702, sept. 2007.
- [77] R. BOIAN, M. BOUZIT, G. BURDEA et J. DEUTSCH, « Dual stewart platform mobility simulator », *Comptes rendus – Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 7, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 4848 – 4851, IEEE, 2004.
- [78] J. FREDERICK P. BROOKS, « Walkthrough a dynamic graphics system for simulating virtual buildings », *Comptes rendus – Workshop on Interactive 3D graphics*, (Chapel Hill, North Carolina, États-Unis), p. 9 – 21, ACM Press, 1987.
- [79] M. HIROSE et K. YOKOYAMA, « Vr application for transmission of synthetic sensation », *Comptes rendus – ICAT*, p. 145 – 154, 1992.
- [80] J. HOLLERBACH, Y. XU, R. CHRISTENSEN et S. JACOBSEN, « Design specifications for the second generation sarcos treadport locomotion interface », *Comptes rendus – Dynamic Systems and Control Division, Haptics Symposium*, vol. 69-2, (Orlando), p. 1293 – 1298, ASME, 2000.
- [81] H. NOMA et T. MIYASATO, « New approach for canceling turning motion in the locomotion interface, atlas », *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division*, vol. 67, p. 405 – 406, 1999.
- [82] D. E. CARMEIN, « Omni-directional treadmill ». brevet des États-Unis no. 5 562 572, oct. 1996.
- [83] P. MÜLLER, P. WONKA, S. HAEGLER, A. ULMER et L. V. GOOL, « Procedural modeling of buildings », *Transactions on Graphics*, vol. 25, n° 3, p. 614 – 623, 2006.

- [84] B. WATSON, P. MULLER, P. WONKA, C. SEXTON, O. VERYOVKA et A. FULLER, « Procedural urban modeling in practice », *Computer Graphics and Applications*, vol. 28, p. 18 – 26, mai 2008.
- [85] J. CHIM, R. LAU, H. LEONG et A. SI, « Cyberwalk : a web-based distributed virtual walkthrough environment », *Transactions on Multimedia*, vol. 5, p. 503 – 515, déc. 2003.
- [86] B. NG, R. LAU, A. SI et F. LI, « Multiserver support for large-scale distributed virtual environments », *Transactions on Multimedia*, vol. 7, p. 1054 – 1065, déc. 2005.
- [87] M. SCHWAIGER, T. THUMMEL et H. ULBRICH, « A 2d-motion platform : the cybercarpet », *Comptes rendus – Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, (Tsukuba, Japan), p. 415 – 420, 2007.
- [88] M. SCHWAIGER, H. ULBRICH et T. THUMMEL, « A foot following locomotion device with force feedback capabilities », *Comptes rendus – VIII Symposium on Virtual Reality*, (Belém, PA, Brasil), p. 1 – 13, mai 2006.
- [89] A. DE LUCA, R. MATTONE et P. R. GIORDANO, « The motion control problem for the cybercarpet », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Orlando, FL, États-Unis), p. 3532 – 3537, IEEE, 2006.
- [90] V. SYSTEMS, « Fully immersive spherical projection system (the cybersphere) ». <http://www.vr-systems.ndtilda.co.uk/sphere1.htm>.
- [91] I. CHOI et C. RICCI, « Foot-mounted gesture detection and its application in virtual environments », *Comptes rendus – International Conference on Systems, Man, and Cybernetics : Computational Cybernetics and Simulation*, vol. 5, (Orlando, FL, États-Unis), p. 4248 – 4253, IEEE, 1997.
- [92] R. KADOBAYASHI, K. NISHIMOTO et K. MASE, « Design and evaluation of gesture interface of an immersive walk-through application for exploring cyberspace », *Comptes rendus – International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, (Nara, Japan), p. 534 – 539, IEEE, 1998.
- [93] M. KOBAYASHI, S. SHIWA, A. KITAGAWA et S. ICHINOSE, « Tilting disc : a real scale interface for cyberspace », *Comptes rendus – SID International Symposium*, vol. 19, (Anaheim, CA, États-Unis), p. 333 – 336, 1998.
- [94] J. M. HIDLER et A. E. WALL, « Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking », *Clinical Biomechanics*, vol. 20, n° 2, p. 184 – 193, 2005.

- [95] M. SHEIK-NAINAR et D. KABER, « The utility of a virtual reality locomotion interface for studying gait behavior », *Human Factors*, vol. 49, n° 4, p. 696 – 709, 2007.
- [96] M. HILLER, S. FANG, S. MIELCZAREK, R. VERHOEVEN et D. FRANITZA, « Design, analysis and realization of tendon-based parallel manipulators », *Mechanism and Machine Theory*, vol. 40, n° 4, p. 429 – 445, 2005.
- [97] T. MORIZONO, K. KURAHASHI et S. KAWAMURA, « Realization of a virtual sports training system with parallel wire mechanism », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, (Albuquerque, NM, États-Unis), p. 3025 – 3030, IEEE, 1997.
- [98] A. T. RIECHEL, P. BOSSCHER, H. LIPKIN et I. EBERT-UPHOFF, « Concept paper : Cable-driven robots for use in hazardous environments », *Comptes rendus – Robotics and Remote Systems*, vol. 10, (Gainesville, FL, États Unis), p. 310 – 316, 2004.
- [99] L. L. CONE, « Skycam : an aerial robotic camera system », *Byte*, vol. 10, n° 10, 1985.
- [100] T. TSUMUGIWA, R. YOKOGAWA et K. HARA, « Variable impedance control with virtual stiffness for human-robot cooperative peg-in-hole task », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, (Lausanne, Switzerland), p. 1075 – 1081, IEEE, 2002.
- [101] B. HANNAFORD et J.-H. RYU, « Time-domain passivity control of haptic interfaces », *Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, n° 1, p. 1 – 10, 2002.
- [102] R. IKEURA, T. MORIGUCHI et K. MIZUTANI, « Optimal variable impedance control for a robot and its application to lifting an object with a human », *Comptes rendus – International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, (Berlin, Allemagne), p. 500 – 505, IEEE, 2002.
- [103] R. IKEURA et H. INOOKA, « Variable impedance control of a robot for cooperation with a human », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, (Nagoya, Japon), p. 3097 – 3102, IEEE, 1995.
- [104] T. TSUMUGIWA, R. YOKOGAWA et K. HARA, « Variable impedance control with regard to working process for man-machine cooperation-work system », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium*, vol. 3, (Maui, HI, États-Unis), p. 1564 – 1569, 2001.

- [105] R. BEGG et J. KAMRUZZAMAN, « A machine learning approach for automated recognition of movement patterns using basic, kinetic and kinematic gait data », *Journal of Biomechanics*, vol. 38, p. 401 – 408, mars 2005.
- [106] S. HOLZREITER et M. KOHLE, « Assessment of gait patterns using neural networks », *Journal of Biomechanics*, vol. 26, p. 645 – 651, juin 1993.
- [107] S. LORD, S. CASTELL, J. CORCORAN, J. DAYHEW, B. MATTERS, A. SHAN et P. WILLIAMS, « The effect of group exercise on physical functioning and falls in frail older people living in retirement villages : a randomized, controlled trial », *Journal of American Geriatric Society*, vol. 51, n° 12, p. 1685 – 1692, 2003.
- [108] B. MAKI, « Gait changes in older adults : predictors of falls or indicators of fears », *Journal of American Geriatric Society*, vol. 45, p. 313 – 320, 1997.
- [109] S. PERREAULT et C. M. GOSSELIN, « Cable-driven parallel mechanisms : Application to a locomotion interface », *Comptes rendus – International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, (Las Vegas, Nevada, États-Unis), ASME, sept. 2007.
- [110] R. NORLIN, P. ODENRICK et B. SANDLUND, « Development of gait in the normal child », *Journal of Pediatric Orthopedics*, vol. 1, p. 261 – 266, 1981.
- [111] S. DAHLSTEDT, « Gait analysis : an introduction », *Comptes rendus – Scientific Basics of clinical neurology*, (Churchill livingstone), 1984.
- [112] M. PANDY et N. BERME, « A numerical method for simulating the dynamics of human walking », *Journal of Biomechanics*, vol. 21, n° 12, p. 1043 – 1051, 1988.
- [113] M. WOJTYRA, « Multibody simulation model of human walking », *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 31, n° 3, p. 357 – 379, 2003.
- [114] M. J. SINGER, J. A. EHRLICH et R. C. ALLEN, « Virtual environment sickness : Adaptation to and recovery from a search task », *Comptes rendus – Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 2, (Chicago, IL, États-Unis), p. 1506 – 1510, 1998.
- [115] S. COBB, S. NICHOLS, A. RAMSEY et J. WILSON, « Virtual reality-induced symptoms and effects (vrise) », *Presence*, vol. 8, p. 169 – 186, avril 1999.
- [116] A. GARRETT, M. AGUILAR et Y. BARNIV, « A recurrent neural network approach to virtual environment latency reduction », *Comptes rendus – International Joint Conference on Neural Networks*, vol. 3, (Honolulu, HI), p. 2288 – 2292, 2002.
- [117] S. J. FRICKER et J. J. SANDERS, « A new method of cone electroretinography : the rapid random flash response », *Investigative ophthalmology*, vol. 14, p. 131 – 137, fév. 1975.

- [118] S. SOKOL et L. A. RIGGS, « Electrical and psychophysical responses of the human visual system to periodic variation of luminance », *Investigative ophthalmology*, vol. 10, p. 171 – 180, mars 1971.
- [119] N. DIOLAITI, G. NIEMEYER, F. BARBAGLI et J. SALISBURY, « A criterion for the passivity of haptic devices », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2005, (Barcelona, Spain), p. 2452 – 2457, IEEE, 2005.
- [120] M. GOUTTEFARDE, *Analyse de l'espace des poses polyvalentes des mécanismes parallèles entraînés par câbles*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Canada, 2005.
- [121] J. YOON et J. RYU, « A novel locomotion interface with two 6-dof parallel manipulators that allows human walking on various virtual terrains », *International Journal of Robotics Research*, vol. 25, p. 689 – 708, juil. 2006.
- [122] S. HESSE, H. SCHMIDT et C. WERNER, « Machines to support motor rehabilitation after stroke : 10 years of experience in berlin », *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 43, n° 5, p. 671 – 678, 2006.
- [123] R. KIKUUWE, T. YAMAMOTO et H. FUJIMOTO, « A guideline for low-force robotic guidance for enhancing human performance of positioning and trajectory tracking : it should be stiff and appropriately slow », *Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, vol. 38, p. 945 – 957, juil. 2008.
- [124] M. YAMAMOTO, N. YANAI et A. MOHRI, « Trajectory control of incompletely restrained parallel-wire-suspended mechanism based on inverse dynamics », *Transactions on Robotics*, vol. 20, n° 5, p. 840 – 850, 2004.
- [125] D. THEODORAKATOS, E. STUMP et V. KUMAR, « Kinematics and pose estimation for cable actuated parallel manipulators », *Comptes rendus – International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 8 PART B, (Las Vegas, NV, États-Unis), p. 1053 – 1062, ASME, 2008.
- [126] J. PARK, J. YOON, Y.-A. LIM et J. RYU, « A smooth planar walking algorithm for virtual walking machine (k-walker) », *Comptes rendus – SICE-ICASE International Joint Conference*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 4786 – 4791, 2006.
- [127] J. YOON, J. PARK et J. RYU, « A symmetric walking cancellation algorithm of a foot-platform locomotion interface », *Comptes rendus – International Conference*

- on *Humanoid Robots*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 668 – 673, IEEE/RAS, 2008.
- [128] V. DUCHAINE et C. M. GOSSELIN, « Investigation of human-robot interaction stability using lyapunov theory », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 2189 – 2194, IEEE, 2008.
- [129] M. J.-D. OTIS, M. MOKHTARI, C. DU TREMBLAY, D. LAURENDEAU, F.-M. DE RAINVILLE et C. M. GOSSELIN, « Hybrid control with multi-contact interactions for 6dof haptic foot platform on a cable-driven locomotion interface », *Comptes rendus – Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (Reno, Nevada), p. 161 – 168, IEEE, 2008.
- [130] S. FANG, D. FRANITZA, M. TORLO, F. BEKES et M. HILLER, « Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution », *Transactions on Mechatronics*, vol. 9, p. 561 – 568, sept. 2004.
- [131] Y. ZHENG et X. LIU, « Optimal tension distribution of wire-driven parallel manipulators », *Jixie Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 41, n° 9, p. 140 – 145, 2005.
- [132] B. CANTIN, « Étude des performances, analyse et optimisation d'un mécanisme parallèle spatial à 6 degrés de liberté entraîné par câbles », Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada, 2004.
- [133] P. LAMBERT, « Dispositif de détection et de gestion des interférences dans l'utilisation simultanée de deux mécanismes parallèles actionnés par câble », rapport technique, Université Laval, Québec, Canada, 2004.
- [134] J. OHLENBURG, « Improving collision detection in distributed virtual environments by adaptive collision prediction tracking », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (Chicago, IL, États-Unis), p. 83 – 90, IEEE, mars 2004.
- [135] A. VOGIANNOU, K. MOUSTAKAS, D. TZOVARAS et M. STRINTZIS, « Enhancing haptic rendering through predictive collision detection », *Comptes rendus – International Conference on Virtual and Mixed Reality*, (Berlin, Allemagne), p. 394 – 402, Springer Verlag, juil. 2009.
- [136] J. H. BLAKELOCK, *Automatic control of aircraft and missiles*. New York : Wiley, 1965.

- [137] F. BARBAGLI, D. FERRAZZIN, C. AVIZZANO et M. BERGAMASCO, « Washout filter design for a motorcycle simulator », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (Yokohama), p. 225 – 232, 2001.
- [138] S.-R. OH et S. AGRAWAL, « Cable suspended planar robots with redundant cables : controllers with positive tensions », *Transactions on Robotics*, vol. 21, p. 457 – 465, juin 2005.
- [139] S. A. ALI, « Dynamic response of sagged cables », *Computers & Structures*, vol. 23, n° 1, p. 51 – 57, 1986.
- [140] C. F. BAICU, C. D. RAHN et B. D. NIBALI, « Active boundary control of elastic cables : Theory and experiments », *Journal of Sound and Vibration*, vol. 198, n° 1, p. 17 – 26, 1996.
- [141] K. VLACHOS et E. PAPADOPOULOS, « Transparency maximization methodology for haptic devices », *Transactions on Mechatronics*, vol. 11, p. 249 – 255, juin 2006.
- [142] J. E. COLGATE et J. M. BROWN, « Factors affecting the z-width of a haptic display », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, (San Diego, CA, États-Unis), p. 3205 – 3210, IEEE, mai 1994.
- [143] N. KILLINGSWORTH et M. KRSTIC, « Auto-tuning of pid controllers via extremum seeking », *Comptes rendus – American Control Conference*, vol. 4, (Portland, OR, États-Unis), p. 2251 – 2256, 2005.
- [144] O. LEQUIN, M. GEVERS, M. MOSSBERG, E. BOSMANS et L. TRIEST, « Iterative feedback tuning of pid parameters : comparison with classical tuning rules », *Control Engineering Practice*, vol. 11, p. 1023 – 1033, sept. 2003.
- [145] N. J. KILLINGSWORTH et M. KRSTIC, « Pid tuning using extremum seeking : On-line, model free-performance optimization », *Control Systems Magazine*, vol. 26, n° 1, p. 70 – 79, 2006.
- [146] N. J. KILLINGSWORTH, S. M. ACEVES, D. L. FLOWERS et M. KRSTIC, « Extremum seeking tuning of an experimental hcci engine combustion timing controller », *Comptes rendus – American Control Conference*, (New York, NY, États-Unis), p. 3665 – 3670, IEEE, 2007.
- [147] J.-C. SHEN et H.-K. CHIANG, « Pid tuning rules for second order systems », *Comptes rendus – Asian Control Conference*, vol. 1, (Melbourne, Australia), p. 472 – 477, juil. 2004.
- [148] A. ABDOSSALAMI et S. SIROUSPOUR, « Adaptive control of haptic interaction with impedance and admittance type virtual environments », *Comptes rendus*

- *Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 145 – 152, IEEE, 2008.
- [149] P. NAGHSHTABRIZI et J. HESPANHA, « Designing transparent stabilizing haptic controllers », *Comptes rendus – American Control Conference*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 2475 – 2480, 2006.
- [150] R. ADAMS, D. KLOWDEN et B. HANNAFORD, « Stable haptic interaction using the excalibur force display », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, (San Francisco, CA, États-Unis), p. 770 – 775, IEEE Robotics and Automation Society, avril 2000.
- [151] I. EBERT-UPHOFF et P. VOGLEWEDE, « On the connections between cable-driven robots, parallel manipulators and grasping », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 5, (New Orleans, LA, États-Unis), p. 4521 – 4526, IEEE, 2004.
- [152] C. BONIVENTO, A. EUSEBI, C. MELCHIORRI, M. MONTANARI et G. VASSURA, « Wireman : a portable wire manipulator for touch-rendering of bas-relief virtual surfaces », *Comptes rendus – International Conference on Advanced Robotics*, (Monterey, CA, États-Unis), p. 13 – 18, 1997.
- [153] V. LEVESQUE, J. PASQUERO et V. HAYWARD, « Braille display by lateral skin deformation with the stress2 tactile transducer », *Comptes rendus – Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007*, (Tsukuba, Japan), p. 115 – 120, mars 2007.
- [154] K. KOZAK, Q. ZHOU et J. WANG, « Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass », *Transactions on Robotics*, vol. 22, p. 425 – 433, juin 2006.
- [155] E. OTTAVIANO, « A system for tension monitoring in cable-based parallel architectures », *Comptes rendus – IFToMM World Congress*, (Besançon, France), juin 2007.
- [156] F. FERLAY et F. GOSSELIN, « A new cable-actuated haptic interface design », *Comptes rendus – Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5024 NCS, (Heidelberg, Allemagne), p. 474 – 483, 2008.
- [157] X. DIAO et O. MA, « Vibration analysis of cable-driven parallel manipulators for hardware-in-the-loop contact-dynamics », *Comptes rendus – International Design*

Engineering Technical Conferences & Computer and Information in Engineering Conference, (Las Vegas, NV), ASME, sept. 2007.

- [158] T. KABAYASHI et Y. TAKAHASHI, « Vibration control for two dimensional wire driven positioning robot », *Comptes rendus – Society of Instrument and Control Engineers (SICE) Annual Conference*, (Tokyo, Japan), p. 869 – 874, 1998.
- [159] D. MAYHEW, B. BACHRACH, W. RYMER et R. BEER, « Development of the macarm - a novel cable robot for upper limb neurorehabilitation », *Comptes rendus – International Conference on Rehabilitation Robotics*, p. 299 – 302, juin 2005.
- [160] T. MORIZONO, K. KURAHASHI et S. KAWAMURA, « Analysis and control of a force display system driven by parallel wire mechanism », *Robotica*, vol. 16, n° 5, p. 551 – 563, 1998.
- [161] M. J.-D. OTIS, S. PERREAU, T.-L. NGUYEN-DANG, P. LAMBERT, M. GOUTTEFARDE, D. LAURENDEAU et C. GOSSELIN, « Determination and management of cable interferences between two 6-dof foot platforms in a cable-driven locomotion interface », *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, vol. 39, p. 528 – 544, mai 2009.
- [162] F.-J. ELMER, « Nonlinear dynamics of dry friction », *Journal of Physics A : Mathematical and General*, vol. 30, n° 17, p. 6057 – 6063, 1997.
- [163] R. G. LANZARA, « Weber's law modeled by the mathematical description of a beam balance », *Mathematical Biosciences*, vol. 122, n° 1, p. 89 – 94, 1994.
- [164] W.-X. REN, G. CHEN et W.-H. HU, « Empirical formulas to estimate cable tension by cable fundamental frequency », *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 20, n° 3, p. 363 – 380, 2005.
- [165] V. DUCHAINE et C. M. GOSSELIN, « General model of human-robot cooperation using a novel velocity based variable impedance control », *Comptes rendus – EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, p. 446 – 451, mars 2007.
- [166] S. SHIMANO, M. SHIONO et K. OHNISHI, « Estimation of acceleration by an ac tachogenerator and its applications to servo control », *Electrical Engineering in Japan*, vol. 110, n° 6, p. 90 – 97, 1990.
- [167] K. MAEDA, S. TADOKORO, T. TAKAMORI, M. HILLER et R. VERHOEVEN, « On design of a redundant wire-driven parallel robot warp manipulator », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, (Detroit, MI, États-Unis), p. 895 – 900, IEEE, 1999.

- [168] J.-P. MERLET, « Analysis of the influence of wires interference on the workspace of wire robots », *Advances in Robot Kinematics*, p. 211 – 218, juin 2004.
- [169] J. KETCHEL et P. LAROCHELLE, « Self-collision detection in spatial closed chains », *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, p. 2305 – 2309, sept. 2008.
- [170] Y. WISCHNITZER, N. SHVALB et M. SHOHAM, « Wire-driven parallel robot : Permitting collisions between wires », *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, n° 9, p. 1007 – 1026, 2008.
- [171] M. J.-D. OTIS, T.-L. NGUYEN-DANG, D. LAURENDEAU et C. GOSSELIN, « Interference estimated time of arrival on a 6-dof cable-driven haptic foot platform », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Kobe, Japon), p. 1067 – 1072, IEEE, mai 2009.
- [172] A. T. RIECHEL et I. EBERT-UPHOFF, « Force-feasible workspace analysis for underconstrained, point-mass cable robots », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 5, (New Orleans, LA, États-Unis), p. 4956 – 4962, IEEE, 2004.
- [173] P. BOSSCHER et I. EBERT-UPHOFF, « Wrench-based analysis of cable-driven robots », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 5, (New Orleans, LA, États-Unis), p. 4950 – 4955, IEEE, 2004.
- [174] A. ALP et S. AGRAWAL, « Cable suspended robots : feedback controllers with positive inputs », *Comptes rendus – American Control Conference*, vol. 1, (Anchorage, AK, États-Unis), p. 815 – 820, IEEE, mai 2002.
- [175] R. VERHOEVEN et M. HILLER, « Estimating the controllable workspace of tendon-based stewart platforms », *Advances in Robot Kinematics*, p. 277 – 284, 2000.
- [176] C. FERRARESI, M. PAOLONI et F. PESCARMONA, « A new methodology for the determination of the workspace of six-dof redundant parallel structures actuated by nine wires », *Robotica*, vol. 25, n° 1, p. 113 – 120, 2007.
- [177] M. GOUTTEFARDE, J.-P. MERLET et D. DANÉY, « Wrench-feasible workspace of parallel cable-driven mechanisms », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Roma, Italy), p. 1492 – 1497, IEEE, avril 2007.
- [178] M. GOUTTEFARDE et C. M. GOSSELIN, « Wrench-closure workspace of six-dof parallel mechanisms driven by 7 cables », *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, vol. 29, n° 4, p. 541 – 552, 2005.

- [179] G. BARRETTE et C. GOSSELIN, « Determination of the dynamic workspace of cable-driven planar parallel mechanisms », *Journal of Mechanical Design*, vol. 127, p. 242 – 248, mars 2005.
- [180] M. HASSAN et A. KHAJEPOUR, « Optimization of actuator forces in cable-based parallel manipulators using convex analysis », *Transactions on Robotics*, vol. 24, n° 3, p. 736 – 740, 2008.
- [181] M. BEST, « Equivalence of some quadratic programming algorithms », *Mathematical Programming*, vol. 30, p. 71 – 87, sept. 1984.
- [182] M. A. NAHON et J. ANGELES, « Force optimization in redundantly-actuated closed kinematic chains », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, (Scottsdale, AZ, États-Unis), p. 951 – 956, IEEE, mai 1989.
- [183] C. CARIGNAN et K. CLEARY, « Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments », *Haptics-e*, vol. 1, n° 2, p. 1 – 14, 2000.
- [184] Y. MIZUGAKI, H. YAMADA et M. SAKAMOTO, « Approach to robotic path generation with obstacle avoidance in lattice point space », *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, vol. 55, n° 514, p. 1399 – 1405, 1989.
- [185] D. PAGANELLI, « A new singularity-free path planning method for a class of fully-parallel planar manipulators », *Comptes rendus – International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 8 PART B, (Las Vegas, NV, États-Unis), p. 971 – 978, ASME, 2008.
- [186] M. A. HASSOUNEH, H.-C. LEE et E. H. ABED, « Washout filters in feedback control : Benefits, limitations and extensions », *Comptes rendus – American Control Conference*, (Boston, MA, États-Unis), p. 3950 – 3955, 2004.
- [187] A. POTT, D. FRANITZA et M. HILLER, « Orientation workspace verification for parallel kinematic machines with constant leg length », *Comptes rendus – Mechatronics and Robotics*, (Aachen, Deutschland), 2004.
- [188] K. ONUKI, H. YANO, H. SAITOU et H. IWATA, « Gait rehabilitation with a movable locomotion interface », *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 43, n° 3, p. 189 – 196, 2007.
- [189] S. KAWAMURA, M. IDA, T. WADA et J.-L. WU, « Development of a virtual sports machine using a wire drive system-a trial of virtual tennis », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems, Human*

- Robot Interaction and Cooperative Robots*, vol. 1, (Pittsburgh, PA, États-Unis), p. 111 – 116, IEEE/RSJ, 1995.
- [190] C. MELCHIORRI et G. VASSURA, « Development and application of wire-actuated haptic interfaces », *Journal of Robotic Systems*, vol. 18, p. 755 – 768, déc. 2001.
 - [191] E. FAULRING, K. LYNCH, J. COLGATE et M. PESHKIN, « Haptic display of constrained dynamic systems via admittance displays », *Transactions on Robotics*, vol. 23, p. 101 – 111, fév. 2007.
 - [192] R. van der LINDE et P. LAMMERTSE, « Hapticmaster - a generic force controlled robot for human interaction », *Industrial Robot*, vol. 30, n° 6, p. 515 – 524, 2003.
 - [193] S. MCJUNKIN, J. E. SPEICH et M. K. O'MALLEY, « Transparency extension in haptic interfaces via adaptive dynamics cancellation », *Comptes rendus – International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 74, 2 PART B, (Orlando, FL, États-Unis), p. 1581 – 1587, ASME/DSC, 2005.
 - [194] R. ADAMS et B. HANNAFORD, « Stable haptic interaction with virtual environments », *Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, p. 465 – 474, juin 1999.
 - [195] M. MOORE et J. WILHELMS, « Collision detection and response for computer animation », *Computer Graphics*, vol. 22, n° 4, p. 289 – 298, 1988.
 - [196] D. BARAFF, « Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies », *Comptes rendus – Conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH)*, (New York, NY, États-Unis), p. 23 – 34, ACM Press, 1994.
 - [197] C. CHEAH, S. KAWAMURA et S. ARIMOTO, « Stability of hybrid position and force control for robotic manipulator with kinematics and dynamics uncertainties », *Automatica*, vol. 39, p. 847 – 855, mai 2003.
 - [198] P. GOLDSMITH, B. FRANCIS et A. GOLDENBERG, « Stability of hybrid position/force control applied to manipulators with flexible joints », *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 14, n° 4, p. 146 – 160, 1999.
 - [199] X. LU et A. SONG, « Stable haptic rendering with detailed energy-compensating control », *Computers & Graphics*, vol. 32, p. 561 – 567, oct. 2008.
 - [200] N. CHOPRA, M. SPONG, R. ORTEGA et N. BARABANOV, « On position tracking in bilateral teleoperation », *Comptes rendus – American Control Conference*, vol. 6, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 5244 – 5249, 2004.
 - [201] C. CHO, J.-B. SONG et M. KIM, « Stable haptic display of slowly updated virtual environment with multirate wave transform », *Transactions on Mechatronics*, vol. 13, p. 566 – 575, oct. 2008.

- [202] J.-H. RYU et C. PREUSCHE, « Stable bilateral control of teleoperators under time-varying communication delay : time domain passivity approach », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Roma, Italy), p. 3508 – 3513, IEEE, 2007.
- [203] H. C. CHO et J. H. PARK, « Impedance control with variable damping for bilateral teleoperation under time delay », *JSME International Journal, Series C : Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 48, n° 4, p. 695 – 703, 2006.
- [204] B. HANNAFORD et J.-H. RYU, « Time domain passivity control of haptic interfaces », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, (Seoul), p. 1863 – 1869, IEEE, 2001.
- [205] S. HIRCHE et M. BUSS, « Passive position controlled telepresence systems with time delay », *Comptes rendus – American Control Conference*, vol. 1, (Denver, CO, États-Unis), p. 168 – 173, 2003.
- [206] M. FARDAD et B. BAMIEH, « A frequency domain analysis and synthesis of the passivity of sampled-data systems », *Comptes rendus – Conference on Decision and Control*, vol. 3, (Nassau, Bahamas), p. 2358 – 2363, IEEE, 2004.
- [207] F. MOBASSER et K. HASHTRUDI-ZAAD, « Adaptive bilateral control using operator elbow impedance », *Comptes rendus – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, (Ottawa, Ont., Canada), p. 1271 – 1274, 2006.
- [208] J. ARTIGAS, J. VILANOVA, C. PREUSCHE et G. HIRZINGER, « Time domain passivity control-based telepresence with time delay », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (Beijing, China), p. 4205 – 4210, IEEE/RSJ, 2006.
- [209] J.-H. RYU, D.-S. KWON et B. HANNAFORD, « Stability guaranteed control : Time domain passivity approach », *Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, p. 860 – 868, nov. 2004.
- [210] V. DUCHAINE et C. GOSSELIN, « Safe, stable and intuitive control for physical human-robot interaction », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 3383 – 3388, mai 2009.
- [211] C. PREUSCHE, G. HIRZINGER, J.-H. RYU et B. HANNAFORD, « Time domain passivity control for 6 degrees of freedom haptic displays », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, (Las Vegas, NV, États-Unis), p. 2944 – 2949, IEEE, 2003.

- [212] J.-H. RYU, Y. S. KIM et B. HANNAFORD, « Sampled- and continuous-time passivity and stability of virtual environments », *Transactions on Robotics*, vol. 20, p. 772 – 776, août 2004.
- [213] J.-H. RYU, C. PREUSCHE, B. HANNAFORD et G. HIRZINGER, « Time domain passivity control with reference energy following », *Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, p. 737 – 742, sept. 2005.
- [214] N. SAKR, J. ZHOU, N. GEORGANAS, J. ZHAO et E. PETRIU, « Robust perception-based data reduction and transmission in telehaptic systems », *Comptes rendus – World Haptics Conference*, (Piscataway, NJ, États-Unis), p. 214 – 219, 2009.
- [215] J. YOON, J. PARK et J. RYU, « A planar symmetric walking cancellation algorithm for a footplatform locomotion interface », *The International Journal of Robotics Research*, p. 1 – 21, mai 2009. sous presse.
- [216] N. LAUZIER, M. GRENIER et C. GOSSELIN, « 2 dof cartesian force limiting device for safe physical human-robot interaction », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Kobe, Japon), p. 253 – 258, IEEE, mai 2009.
- [217] D. I. GROW et J. M. HOLLERBACH, « Harness design and coupling stiffness for two-axis torso haptics », *Comptes rendus – Virtual Reality*, vol. 2006, (Alexandria, VA, États-Unis), p. 83 – 87, IEEE, mars 2006.
- [218] SENSEGRAPHICS, « H3d open source haptics », 2004. <http://www.h3dapi.org/>.
- [219] R. SMITH, « Ode, open dynamics engine », 2000. <http://www.ode.org/>.
- [220] S. BOYD et B. WEGBREIT, « Fast computation of optimal contact forces », *Transactions on Robotics*, vol. 23, p. 1117 – 1132, déc. 2007.
- [221] D. RUSPINI et O. KHATIB, « A framework for multi-contact multi-body dynamic simulation and haptic display », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, (Takamatsu), p. 1322 – 1327, IEEE, 2000.
- [222] F.-T. CHENG et D. E. ORIN, « Efficient algorithm for optimal force distribution - the compact-dual lp method », *Transactions on Robotics and Automation*, vol. 6, n° 2, p. 178 – 187, 1990.
- [223] R. RAMANATHAN et D. METAXAS, « Dynamic deformable models for enhanced haptic rendering in virtual environments », *Comptes rendus – Virtual Reality Annual International Symposium*, (New Brunswick, NJ, États-Unis), p. 31 – 35, 2000.

- [224] C. DURIEZ, F. DUBOIS, A. KHEDDAR et C. ANDRIOT, « Realistic haptic rendering of interacting deformable objects in virtual environments », *Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 12, n° 1, p. 36 – 47, 2006.
- [225] R. REILLY, M. AMIRINIA et R. SOAMES, « A two-dimensional imaging walkway for gait analysis », *Comptes rendus – Computer-Based Medical Systems Symposium*, (Baltimore, MD, États-Unis), p. 145 – 152, IEEE, 1991.
- [226] N. MELDER et W. HARWIN, « Extending the friction cone algorithm for arbitrary polygon based haptic objects », *Comptes rendus – International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, (Chicago, IL, États-Unis), p. 234 – 241, 2004.
- [227] L. JOLY et A. MICAELLI, « Hybrid position/force control, velocity projection, and passivity », *Comptes rendus – Robot Control (SYROCO)*, vol. 1, (Nantes, France), p. 325 – 331, 1998.
- [228] G. BILLETTE et C. GOSSELIN, « Producing rigid contacts in cable-driven haptic interfaces using impact generating reels », *Comptes rendus – International Conference on Robotics and Automation*, (Kobe, Japan), IEEE, 2009.
- [229] C. DURIEZ, C. ANDRIOT et A. KHEDDAR, « Signorini's contact model for deformable objects in haptic simulations », *Comptes rendus – International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 4, (Sendai, Japan), p. 3232 – 3237, IEEE, 2004.
- [230] J. PARK, S.-Y. KIM et D.-S. KWON, « Mechanical representation of shape-retaining chain linked model for real-time haptic rendering », *Comptes rendus – International Symposium on Medical Simulation*, vol. 3078, (Berlin, Allemagne), p. 144 – 152, IEEE Comput. Soc, mars 2004.
- [231] C. MANESCHY, M. MASSOUDI et V. VELLOSO, « Dynamic elastic solutions in neo-hookean and mooney-rivlin materials », *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 28, n° 5, p. 531 – 534, 1993.
- [232] J. SPILLMANN, M. BECKER et M. TESCHNER, « Non-iterative computation of contact forces for deformable objects », *Journal of WSCG*, vol. 15, n° 1-3, p. 33 – 40, 2007.
- [233] R. HOSMAN, « Visual-vestibular interactions in the perception and control of aircraft motions by the pilot », *Comptes rendus – AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*, (New Orleans, LA, États-Unis), p. 402 – 411, 1997.

- [234] A. S. BAZANELLA, P. V. KOKOTOVIC et A. S. E SILVA, « On the control of dynamic systems with unknown operating point », *International Journal of Control*, vol. 73, n° 7, p. 600 – 605, 2000.
- [235] S.-C. WANG et L.-C. FU, « Predictive washout filter design for vr-based motion simulator », *Comptes rendus – International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 7, (The Hague, Pays-Bas), p. 6291 – 6295, IEEE, 2004.
- [236] R. M. FUJIMOTO, *Parallel and distributed simulation system*. Canada : John Wiley/Son, 2000.
- [237] OIQ, « Pratique illégale et sécurité des machines », *Comptes rendus – Plan*, (Montréal, Québec), p. 30 – 35, 2006.

Annexe A

Liste des extensions multimédia sur le DVD d'accompagnement

Cette annexe présente les extensions multimédia disponibles avec cet ouvrage. Le DVD contient l'ensemble des clips vidéos qui se rapportent aux contributions de la thèse ainsi que quelques photos du mécanisme.

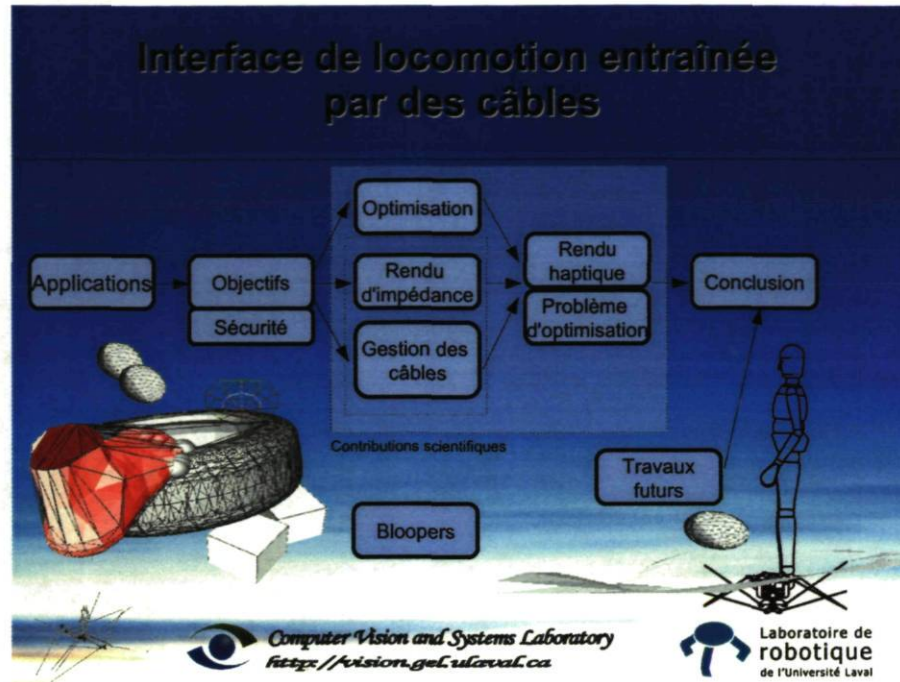


Figure A.1: Menu interactif contenu sur le DVD

A.1 Fonctionnement du DVD

Le DVD est divisé en trois sections : la section A.1.1 qui présente les clips vidéos, la section A.1.2 qui présente les images du mécanisme et la section A.1.3 qui présente la documentation sur le matériel du mécanisme. Les sections A.1.1 et A.1.2 sont accessibles uniquement par le menu interactif du DVD. Il faut donc s'assurer que le lecteur DVD puisse lire correctement le contenu interactif. D'un autre côté, la section A.1.3) est accessible par le gestionnaire des fichiers du système d'exploitation.

A.1.1 Explication des clips vidéos

La figure A.1 montre le menu interactif du DVD. Chaque zone permet de démarrer un clip vidéo des contenu dans les sections A.1.1.1 à A.1.1.8.

A.1.1.1 Objectifs et sécurité d'interaction

Ce clip présente les quatre éléments de sécurité développés dans le chapitre 7 à la section 7.1.5. Chaque élément est présenté individuellement de manière à clarifier les énoncés développés dans ce chapitre.

A.1.1.2 Optimisation de l'asservissement

Le premier défi est de réaliser un algorithme qui optimise le rendu d'impédance articulaire et le rendu haptique cartésien. L'algorithme développé est présenté au chapitre 4. Ce clip vidéo présente le contrôle de la tension articulaire. La première section montre l'équilibrage d'une masse pour un enrouleur afin de vérifier la calibration finale de la jauge de contrainte et de l'amplificateur. Par la suite, deux enrouleurs sont placés face à face de manière à vérifier que les tensions commandées sont similaires. Un test simple est d'entrer une impulsion au système et de calculer le temps de stabilisation. Ce test correspond à un tir à l'arc. La dernière section présente l'équilibrage de la plate-forme avec l'aide d'une commande en tension.

A.1.1.3 Rendu de l'impédance

Le rendu d'impédance se caractérise par deux caractéristiques comme le chapitre 5 le décrit. La première est d'éliminer la sensation qu'un mécanisme réel est relié à l'utilisateur lorsqu'il n'y a pas de contact avec l'environnement virtuel. La seconde caractéristique correspond au rendu d'un contact infiniment rigide de manière à ce que l'asservissement demeure stable. Ce clip présente donc ces deux caractéristiques. Finalement, puisqu'il n'est pas possible d'asservir la plate-forme avec l'aide de la programmation quadratique à l'extérieur de l'espace de travail, une commande hybride articulaire en tension et en position est développée. La dernière section de ce clip présente ce problème.

A.1.1.4 Gestion des interférences

Les interférences entre les câbles causent un problème d'asservissement articulaire lorsque la programmation quadratique est utilisée pour déterminer la consigne de la commande. Ce clip présente les résultats pratiques du chapitre 6 lorsque les câbles 2 et

6 se croisent.

A.1.1.5 Intégration avec une commande hybride

La commande hybride du chapitre 7 est mise en oeuvre avec l'aide du moteur physique *Newton Game Dynamics*. Ce clip présente les interactions entre une plateforme et les objets virtuels.

A.1.1.6 Problème d'optimisation des forces

Le problème d'optimisation des forces est une contribution intéressante pour une interface de locomotion entraînée par des câbles. Ce clip présente les figures 7.14 de la section 7.4.3.

A.1.1.7 Conclusion et résultats finaux

Ce clip présente le robot marcheur Kondo KHR-1HV sur l'interface de locomotion. Le robot effectue quelques mouvements dont : déplacer deux cubes virtuels, avancer, tourner et se déplacer de côté avec ses pieds. Finalement, une partie de l'algorithme du rappel du chapitre 8 est présentée lorsque l'utilisateur monte une côte.

A.1.1.8 Compilation de clips

Ce clip présente quelques situations cocasses et décourageantes lors de l'essai des algorithmes présentés dans cette thèse.

A.1.2 Explication des images

Les images du mécanisme présentées dans cette thèse sont compilées sur le DVD et sont accessibles à l'aide du menu interactif.

A.1.3 Documentation supplémentaire sur le mécanisme

La documentation supplémentaire présente la conception de l'électronique ainsi que le choix du matériel. Entre autres, la conception des amplificateurs 4-20 mA est développée.